



**António Esteves
Correia**

**Uma Abordagem à Maquinagem a Alta Velocidade,
com recurso a turbinas pneumáticas de alta rotação**



**António Esteves
Correia**

**Uma Abordagem à Maquinagem a Alta Velocidade,
utilizando turbinas pneumáticas de alta rotação**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor João Paulo Davim, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

o júri

Presidente:

Prof. Doutor José Joaquim de Almeida Grácio
Professor catedrático da Universidade de Aveiro

Vogais:

Prof. Doutor António Paulo Monteiro Baptista
Professor associado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof. Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva
Professor auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar ao Prof. Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva, supervisor deste trabalho e meu orientador científico, pelo apoio e incentivo que sempre me transmitiu e pela disponibilidade dos meios materiais e humanos que me proporcionou para a realização desta dissertação.

O meu profundo agradecimento ao Prof. Doutor António Paulo Monteiro Baptista pela cedência de inúmeros artigos da sua pesquisa bibliográfica.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro pela disponibilidade dos laboratórios e equipamentos.

À Escola Superior de Tecnologia de Viseu que através do DEMGi – Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial me proporcionou os meios materiais e humanos para a realização dos ensaios experimentais. Ao anterior e ao actual Director de Departamento, Doutor João Luís Paiva e Eng.º António Teixeira de Almeida, o meu agradecimento e reconhecimento, pela cordialidade, espírito de abertura e disponibilidade que sempre manifestaram, nunca regateando qualquer tipo de apoio sempre que ele foi necessário.

Ao Dr. João Vinhas, docente do DEMGi, da ESTV, por todo o apoio e colaboração.

À Vista Representações, representante da Sandvik® em Viseu, na pessoa do Sr. Vítor Martins, que patrocinou grande parte das ferramentas para realização dos ensaios e que manifestou sempre a sua disponibilidade e colaboração.

À empresa MECOIN pela colaboração na análise dimensional das peças maquinadas.

A todas as empresas e marcas referidas no texto que gentilmente autorizaram a reprodução das ilustrações.

Agradeço também ao Eng.º Adelino Trindade pelo apoio que sempre manifestou à realização deste trabalho.

Ao Nelson Rafael, técnico do DEMGi pela preciosa ajuda na realização da parte experimental e por ter estado sempre disponível para colaborar em tarefas que estão muito além do que as suas obrigações profissionais lhe exigem.

Ao Eng.º Pedro Reis que disse sempre “sim” a todos os pedidos de ajuda.

Ao Eng.º Luís Figueira pelo apoio e colaboração na fase de revisão deste trabalho.

Finalmente, mas não por último, à minha esposa e ao meu filho, pela paciência que tiveram comigo nos últimos dois anos e a quem espero poder compensar pelo tempo que não passámos juntos.

resumo

Com este trabalho pretende-se fazer uma abordagem à Maquinagem a Alta Velocidade, procurando reunir os conceitos inerentes e apresentar os recentes desenvolvimentos nesta área. É feita uma referência aos diversos factores que contribuem para a efectiva aplicação desta tecnologia.

A componente experimental contempla um conjunto de ensaios com o objectivo de avaliar as potencialidades da utilização de turbinas pneumáticas de alta rotação como uma opção válida na maquinagem de geometrias complexas.

O material utilizado foi uma liga de Alumínio (7050), dado o aumento crescente na sua utilização em sectores de actividade como a indústria aeronáutica, indústria automóvel e indústria de moldes.

São avaliados os efeitos dos parâmetros processuais, velocidade de corte e avanço, na qualidade das superfícies obtidas, no que respeita à rugosidade e precisão dimensional das superfícies maquinadas.

abstract

The objective of this work is the study of the High Speed Machining, dealing with related concepts and recent developments in this area. A reference is made to the different aspects, which contribute for the effective application of this technology.

The experimental component groups a set of tests with the goal of evaluate the capacity of using air turbine tools of high speed as a valid option in the complex geometry machining.

The used material was an aluminium alloy, (7050) as a result of its crescent application in aeronautics, automobile and moulding industries.

Process parameters are evaluated, such as speed and feed rate, observing roughness and dimensional accuracy of the obtained surfaces.

SIMBOLOGIA	1
ABREVIATURAS	2
1 INTRODUÇÃO	5
1.1 Enquadramento, objectivos e descrição do trabalho	5
2 FUNDAMENTOS DA MAQUINAGEM A ALTA VELOCIDADE	13
2.1 Breve evolução histórica	13
2.2 Conceito de maquinagem a alta velocidade	16
2.3 Aplicações	20
2.4 Máquinas-ferramenta de alta velocidade	21
2.4.1 Aspectos construtivos	21
2.4.2 Elementos constituintes	22
2.4.2.1 Estrutura	23
2.4.2.2 Grupo cinemático	25
2.4.2.3 Grupo de controlo	30
2.4.2.4 Acessórios	31
2.5 Lubrificação / Refrigeração	32
2.5.1 Utilização dos fluidos de corte na maquinagem a alta velocidade	35
2.5.2 Classificação dos fluidos de corte	36
2.5.3 Selecção dos fluidos de corte	36
2.5.4 Aspectos ecológicos relacionados com a lubrificação.	
Lubrificação mínima	38
2.5.4.1 Métodos de aplicação dos fluidos de corte	39
2.5.4.2 Utilização de Quantidade Mínima de Lubrificante (MQL)	39
2.5.4.3 Técnicas para aplicação da Lubrificação mínima	40
2.6 Ferramentas de corte	44
2.6.1 Materiais	44
2.6.2 Revestimentos	45
2.6.3 Geometria	46
2.7 Fixação das ferramentas	47
2.7.1 Equilíbrio dos cones para maquinagem a alta velocidade	49
2.7.2 Efeitos do desequilíbrio	52
2.7.3 Fontes do desequilíbrio dos porta-ferramentas	53

2.7.4 Influência do comprimento da ferramenta nas condições de equilíbrio	54
2.8 Controladores e integração CAD/CAM	57
2.8.1 Parâmetros operatórios do controlador	59
3 MAQUINAGEM A ALTA VELOCIDADE – “ESTADO DA ARTE”	83
4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	97
4.1 Introdução	97
4.2 Material maquinado	97
4.3 Ferramentas	98
4.4 Centro de maquinagem utilizado	100
4.5 Sistema desenvolvido para a Lubrificação mínima	107
4.6 Métodos de caracterização	109
5 SIMULAÇÃO DA MAQUINAGEM / PEÇA PADRÃO	115
5.1 “Software”	115
5.2 Seleção da peça a maquinar / Peça padrão	115
6 RESULTADOS OBTIDOS E SUA DISCUSSÃO	133
6.1 Introdução	133
6.2 Optimização dos parâmetros de corte com ferramenta de topo raso em provetes planos	134
6.3 Optimização das estratégias na peça padrão	143
6.4 Optimização dos parâmetros de corte na peça padrão	152
7 SÍNTESE, CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	165
7.1 Síntese	165
7.2 Conclusões	166
7.3 Trabalhos futuros	167
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	171

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento, objectivos e descrição do trabalho

A segunda metade do século XX foi marcada por uma fase de desenvolvimento sem precedentes. Esse desenvolvimento deveu-se sobretudo à rápida evolução dos meios tecnológicos de fabrico, que permitiram produzir cada vez mais rápido e com melhor qualidade.

A melhoria constante da qualidade dos materiais, da precisão das máquinas-ferramenta, da electrónica, da informática e dos meios de controlo, tornou possível uma evolução contínua dos meios de produção.

Este processo ocorreu, fruto da utilização das novas tecnologias em todos os sectores de actividade. Hoje, é possível criar, modelar, simular, analisar e corrigir um componente, um conjunto mecânico ou mesmo um equipamento completo, antes de ser fabricado. Quando é solicitada uma solução para um problema ou quando se pretende inovar, é possível apresentar ao cliente, não um desenho ou um esboço, mas um modelo físico à escala real. Tudo isto acontece num espaço de horas ou de poucos dias.

A movimentação de pessoas e bens aumenta constantemente. Os meios de transporte são por isso cada vez mais utilizados. A evolução da indústria automóvel e aeronáutica tem contribuído para o crescimento da indústria de moldes e de componentes. Especialmente nestas indústrias tem-se verificado um crescimento assinalável na utilização de alumínio. As previsões apontam para um aumento no consumo deste material, de um milhão de toneladas/ano em 1999, para mais de dois milhões de toneladas/ano em 2009¹.

A evolução da Engenharia de Produto conduziu a uma maior dinâmica na colocação de novos produtos no mercado, com geometrias inovadoras e funcionais, mas também mais complexas.

O ciclo de vida dos produtos é cada vez mais curto e conduz à produção de pequenas séries de peças. Neste contexto, os moldes em aço podem por vezes ser substituídos por moldes de alumínio. Ganha-se assim muito tempo na produção de um novo molde.

¹ www.plansee.com

As máquinas-ferramenta têm evoluído de forma a acompanhar as necessidades de produção. Mas perante a evolução constante, há necessidade de actualizar as máquinas-ferramenta ou adquirir máquinas mais recentes. Qualquer das soluções resulta num investimento elevado.

Recentemente têm surgido no mercado turbinas a ar comprimido que permitem trabalhar com ferramentas de pequeno diâmetro (até 6 mm). Podem atingir 30.000, 40.000 ou mesmo 60.000 rpm. Estas turbinas podem ser montadas na árvore da máquina e aproveitar os avanços programáveis da mesma, para realizar operações de acabamento.

Na figura 1.1 pode ser observada uma turbina de alta rotação (40.000 rpm) a realizar o acabamento de uma peça.



Figura 1.1 Realização de uma operação de acabamento com utilização de uma turbina pneumática de 40.000 rpm (*Air Turbine Tools*®)

Esta solução poderá constituir, para algumas aplicações, uma plataforma intermédia entre a maquinagem “standard” e a maquinagem a alta velocidade.

Pelas razões apresentadas, justifica-se o estudo de maquinagem com recurso a estas turbinas, para avaliar o seu desempenho e as condições da sua utilização.

A protecção do meio ambiente tem conduzido à pesquisa e desenvolvimento de soluções de maquinagem mais ecológicas. A maquinagem a seco e a utilização de quantidade mínima de lubrificante (MQL – *Minimal Quantity of Lubricant*) são duas técnicas em desenvolvimento e com resultados já comprovados.

Este trabalho tem como principal objectivo a realização de um estudo para avaliar o comportamento de uma turbina de 40000 rpm, face a diferentes estratégias de maquinagem e parâmetros de corte.

A realização de testes com utilização de quantidade mínima de lubrificante (MQL) permitirá também avaliar o comportamento das ferramentas e a qualidade das superfícies obtidas nestas condições.

Serão usadas ferramentas informáticas (CAD) para a modelação das peças a maquinar e para a produção dos programas (CAM). Neste contexto, serão analisados problemas relacionados com a integração CAD/CAM/CNC e com a utilização de pós processadores como plataforma de comunicação entre o CAM e o controlador da máquina.

Serão analisadas diferentes geometrias, com o propósito de elaborar uma **peça padrão** que permita avaliar o desempenho da máquina-ferramenta na maquinagem de geometrias complexas.

O desenvolvimento do trabalho teve por base o esquema representado na figura 1.2. Este esquema ilustra a interacção das diferentes variáveis, tendo como referência central a peça a maquinar. É necessário analisar algumas **variáveis fundamentais**:

- ? **Geometria da peça;**
- ? **Máquina-ferramenta;**
- ? **Estratégias de maquinagem;**
- ? **Ferramentas.**

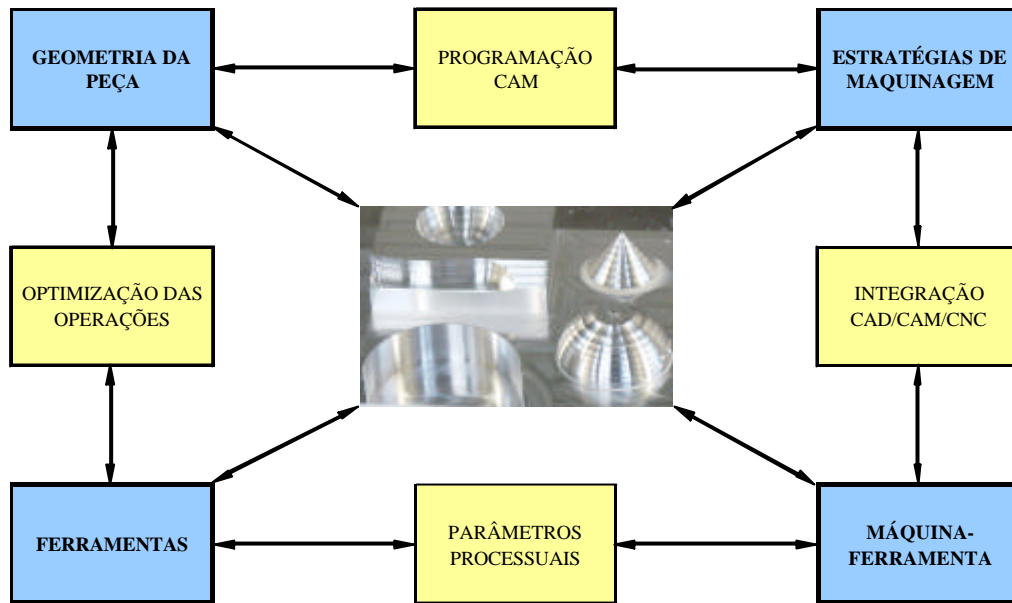


Figura 1.2 Interação das diferentes variáveis no fabrico de uma peça

A interação das variáveis fundamentais é feita através das **variáveis operacionais**:

- ? **Optimização das operações;**
- ? **Parâmetros processuais;**
- ? **Programação CAM;**
- ? **Integração CAD/CAM/CNC;**

Pode dizer-se que a obtenção de uma peça envolve dois tipos de abordagem: uma baseada nas **variáveis fundamentais** e outra baseada nas **variáveis operacionais**.

Estas abordagens não decorrem em momentos predeterminados mas sim em simultâneo com a evolução do protótipo. Na fase de concepção a peça fornece um conjunto de elementos geométricos que permitem seleccionar a máquina e as ferramentas adequadas ao seu fabrico. Com base na geometria é possível seleccionar as estratégias mais convenientes. Em simultâneo é feita a optimização das operações para minimizar a troca de ferramentas, seleccionam-se os parâmetros processuais (parâmetros de corte, refrigeração, compensação do diâmetro da ferramenta, entrada e saída da ferramenta no material) e faz-se a programação de acordo com as características do controlador da máquina.

Este trabalho engloba a concepção de modelos e sua maquinagem. Será avaliado o desempenho de uma turbina de alta rotação em operações de acabamento. Essa avaliação será feita através de um estudo comparativo dos resultados obtidos com a turbina de alta rotação e com a rotação “standard” da máquina-ferramenta utilizada.

O trabalho desenvolvido é apresentado em sete capítulos que passam a descrever-se:

- ? No *capítulo 1*, é feito o enquadramento e a justificação do trabalho, face à realidade industrial actual.
- ? No *capítulo 2* são descritos os fundamentos da maquinagem a alta velocidade, com referência aos factores que contribuem para a sua aplicação, tais como máquinas-ferramenta, lubrificação, ferramentas de corte, dispositivos de fixação, controladores e integração CAD/CAM/CNC.
- ? O *capítulo 3* é dedicado ao “*estado da arte*”. São analisadas algumas das mais recentes evoluções nesta área, com base numa pesquisa bibliográfica.
- ? No *capítulo 4* é feita a descrição da metodologia experimental, detalhando os diversos aspectos relacionados com o material, ferramentas, máquinas e equipamentos utilizados nos ensaios.
- ? O *capítulo 5* é dedicado à simulação da maquinagem até à obtenção de uma peça padrão que permita reunir diversas geometrias de elevada complexidade.
- ? No *capítulo 6* é feita a análise e discussão dos resultados obtidos na fresagem de superfícies planas e de geometrias complexas. É avaliado o desempenho da turbina de alta rotação, comparativamente à cabeça “standard” da máquina-ferramenta. Nesta avaliação são considerados parâmetros de rugosidade e precisão dimensional. São também avaliadas as estratégias de maquinagem ensaiadas, face às diferentes geometrias constituintes da peça padrão.
- ? No *capítulo 7* é feita uma pequena síntese e são retiradas as conclusões mais importantes do trabalho desenvolvido, perspectivando alguns dos temas futuros a investigar na área da maquinagem.

2 FUNDAMENTOS DA MAQUINAGEM A ALTA VELOCIDADE

2.1 Breve evolução histórica

Os primeiros ensaios relacionados com o corte por arranque de apra a alta velocidade, datam dos anos vinte do século passado (*Schulz, 1997*). Devido à inexistência de máquinas de elevada rotação, foram usadas serras circulares de grande diâmetro para obter as velocidades periféricas desejadas, apesar das baixas rotações da árvore. Com este recurso, *Salomon*¹, pioneiro no estudo desta tecnologia, realizou ensaios de maquinagem em aços e ligas não ferrosas, utilizando as seguintes velocidades de corte (m/min): 440 (aço), 1600 (bronze), 2480 (cobre), 16500 (alumínio).

Dos trabalhos realizados por *Salomon* o principal resultado foi a verificação de que acima de determinada velocidade de corte, as temperaturas de corte começavam a diminuir. Contudo, os dados experimentais até agora obtidos, não permitem definir com clareza os limites de velocidade de corte, a partir dos quais se verifica essa redução de temperatura. O gráfico da figura 2.1 é um dos mais divulgados relativamente à evolução das temperaturas no processo de maquinagem.

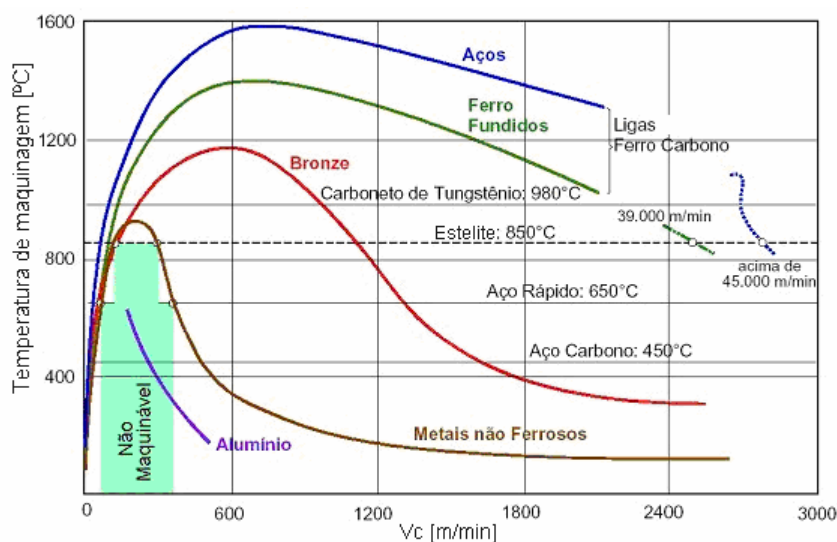


Figura 2.1 Evolução da temperatura com a velocidade de corte, para diferentes materiais (*Schulz, 1997*)

¹ *Carl Salomon* foi o responsável pelo desenvolvimento do conceito básico de HSC (*High Speed Cutting*). Com base nos seus estudos, a empresa alemã “*Friedrich Krupp AG*” recebeu em 27 de Abril de 1931 a patente com o nº 523594, referente ao processo de maquinagem de materiais com comportamento semelhante quando maquinados com ferramentas de corte (*Schutzer K., 2003*).

Nestes gráficos não é feita qualquer referência à forma como foram obtidos, nem aos meios experimentais utilizados, pelo que estes acabam por se revelar apenas como indicadores.

Por volta de 1950, os trabalhos de *Salomon* foram retomados, recorrendo então a ensaios balísticos, em virtude de não existirem ainda máquinas-ferramenta capazes de atingir velocidades de rotação elevadas. Segundo (*Schulz, 1997*), esses ensaios foram realizados de dois modos. Um deles consistia em fixar a ferramenta sobre um foguete que se deslocava sobre um trilho. No seu percurso era colocada uma peça imóvel sobre a qual chocava a ferramenta. Outro método consistia em disparar um projétil com a geometria da peça a ensaiar, que chocava contra a ferramenta imóvel.

Com a realização de ensaios balísticos verificou-se que para elevadas velocidades de corte, as condições de formação da apara são diferentes, quando comparadas com o processo convencional de maquinagem (*Schutzer e tal, 2003*). Foi também possível estabelecer a relação para o cálculo da força específica de corte e comprovar que a força de corte aumenta numa fase inicial com o aumento da velocidade de corte, decaindo a partir de um dado valor, para depois voltar a aumentar. Ensaios realizados posteriormente vieram também demonstrar que existe uma variação na formação da apara com a alteração da velocidade de corte. Com o aumento da velocidade de corte, a apara inicialmente contínua, torna-se descontínua. Este facto deve-se a que com velocidades de corte elevadas, deixa de haver deformação plástica do material, sendo a apara o resultado de um processo de rotura do mesmo.

A partir de 1960, nos Estados Unidos e no Japão, os estudos evoluíram no sentido de relacionar as velocidades de corte elevadas com as vibrações, desgaste das ferramentas e produtividade.

Segundo (*Schulz, 1997*), em 1977 no Estados Unidos, com a utilização de velocidades de corte elevadas em fresagem, registou-se uma melhoria no acabamento das superfícies das peças maquinadas. Outra verificação importante foi que o calor gerado no processo de corte a alta velocidade é dissipado na sua maior parte pela apara.

Em 1979, com a cooperação entre a Força Aérea dos Estados Unidos e a General Electric, foram estudadas as condições de aplicabilidade da Maquinagem a Alta Velocidade nos processos industriais. Com estes estudos, verificou-se que a maquinagem das ligas de alumínio seria otimizada numa gama de velocidades de corte compreendida entre 1500 e 4500 m/min. Desta forma, foi possível estabelecer um conjunto de características funcionais que deviam ser respeitadas pelas máquinas-ferramenta de alta velocidade.

Na mesma época, na Europa, o *Instituto de Gestão da Produção, Tecnologia e Máquinas-Ferramenta da Universidade Técnica de Darmstadt* na Alemanha, iniciou um projecto para desenvolvimento de um eixo-árvore de alta velocidade, com apoios magnéticos activos e respectiva aplicação em máquinas-ferramenta. Este desenvolvimento permitiu que em 1980 fosse possível a utilização efectiva da alta velocidade nas máquinas-ferramenta (Schutzer et al; 2003).

Segundo (Schutzer et al; 2003), a maquinagem a alta velocidade era vista inicialmente com algum receio em termos de aplicação industrial. Fruto do lançamento de um projecto sobre “Fresagem a alta Velocidade de materiais metálicos e não metálicos” em 1984, financiado pelo Ministério Federal para a Pesquisa e Tecnologia na Alemanha, iniciou-se um processo de divulgação e desenvolvimento desta tecnologia, liderado pelo *Instituto de Gestão da Produção, Tecnologia e Máquinas-Ferramenta da Universidade de Darmstadt* – Alemanha, com a supervisão do Prof. *Herbert Schulz*.

Com a evolução das propriedades dos materiais usados na indústria de componentes, houve necessidade de proceder a novos desenvolvimentos das ferramentas de corte ao nível da sua geometria e dos materiais e técnicas usadas no seu fabrico. Outro aspecto importante que tem merecido o interesse de investigadores como (Brinksmeier et al, 2002), (Moufki et al, 2002), (El Mansori et al, 2002) é o estudo do processo de formação da apara e como a variação dos parâmetros de maquinagem afecta a sua forma e a vida das ferramentas.

Nos anos seguintes e até aos dias de hoje, tem-se assistido à evolução desta tecnologia de uma forma integrada. A evolução das máquinas-ferramenta de alta velocidade, não pode ser vista isoladamente. A sua evolução terá que ser analisada em conjunto com os processos de fabrico, ferramentas de corte, sistemas de fixação das peças e das ferramentas, tecnologias CAD/CAM e estratégias de maquinagem (*Schutzer et al, 2003*).

2.2 Conceito de maquinagem a alta velocidade

A designação de maquinagem a alta velocidade surge normalmente na literatura da especialidade na sua forma internacionalmente conhecida: *High Speed Machining* (HSM). Podem também encontrar-se as designações *High Speed Cutting* (HSC) ou *High Speed Milling* (HSM). Os autores franceses adoptam as suas designações de *Usinage à Grande Vitesse* (UGV) ou de *Fraisage à Grande Vitesse* (FGV). Em Portugal, são também utilizadas as duas designações correspondentes: Maquinagem a Alta velocidade (MAV) e Fresagem a Alta Velocidade (FAV). O termo *fresagem* é direccionado apenas para uma das vertentes da maquinagem a alta velocidade. No entanto esta tecnologia é também aplicada a outros processos como a furação, o torneamento e a roscagem.

Por questões de uniformidade de linguagem, ao longo deste trabalho será utilizada a designação genérica na sua forma original, *High Speed Machining* (HSM).

Os progressos tecnológicos verificados nos últimos anos tornaram possível uma evolução significativa dos processos de maquinagem. As ferramentas permitem velocidades de corte elevadíssimas; as máquinas-ferramenta adquiriram melhor desempenho. O aparecimento de ferramentas motorizadas permitiu a combinação de operações de torneamento e fresagem na mesma máquina e com um único aperto da peça. A evolução da electrónica e da informática permitiu construir controladores que processam centenas de blocos de programa por segundo.

A referência a HSM tem associadas duas condições básicas e fundamentais: velocidades de rotação elevadas e velocidades de avanço elevadas. Contudo, estes dois aspectos estão condicionados pela operação, pela geometria da peça e pelo material a maquinar. Nas figuras 2.2 e 2.3 são apresentadas as gamas de velocidade de corte em função dos materiais a maquinar e das operações de maquinagem, respectivamente.

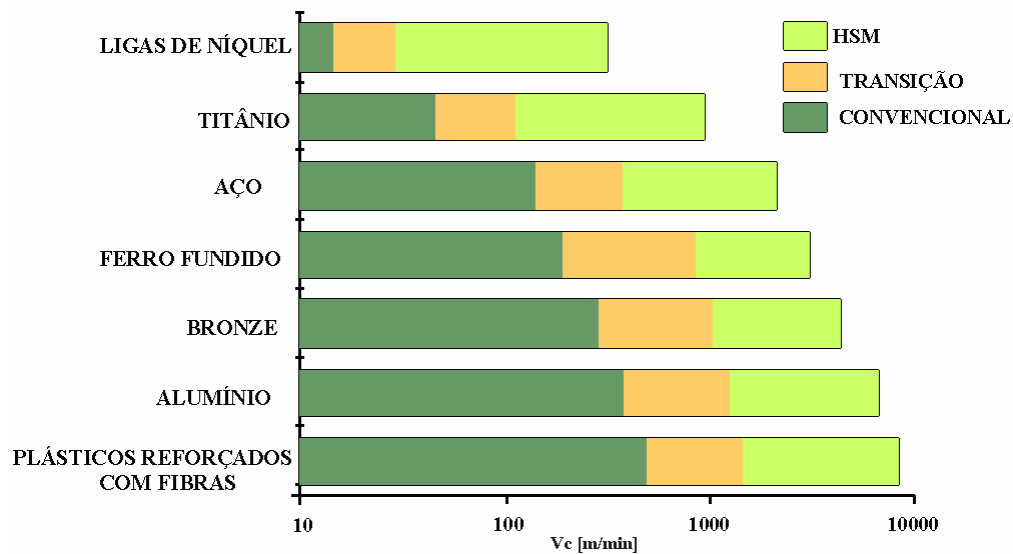


Figura 2.2 Gama de velocidades de corte para maquinagem de diferentes materiais (*Fallbohmer et al, 2000*)

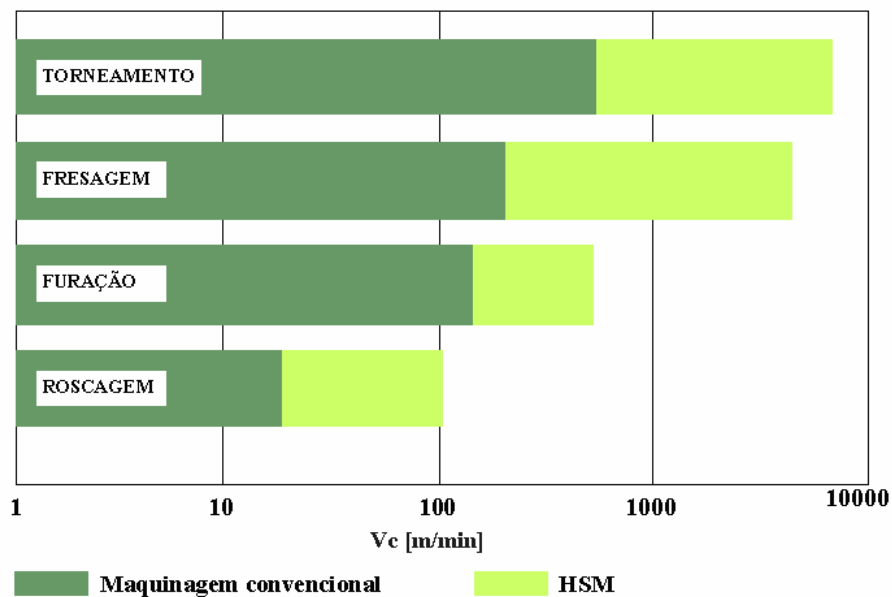


Figura 2.3 Gama de velocidades de corte para diferentes operações de maquinagem (*Selada et al, 2000*)
(*Titex Plus^{®1}*)

A análise dos gráficos das figuras 2.2 e 2.3 tornam evidente a relatividade do conceito de HSM. Como se pode observar por exemplo para o caso do alumínio, a alta velocidade é atingida próximo dos 1000 m/min. No entanto, esse valor não pode ser usado nas operações de furação e roscagem.

¹ Titex Plus – *High Speed Cutting with Titex Plus Tools* (catálogo P 248 02 00 E)

Quando se procura definir HSM, são colocados em evidência diferentes conceitos, de acordo com o que se pretende obter com esta tecnologia. Podem assim encontrar-se diversas abordagens, segundo (Kief, 1998) que destacam uma ou várias vertentes, por exemplo:

- ? **Elevadas velocidades de rotação da ferramenta de corte;**
- ? **Elevadas velocidades de avanço;**
- ? **Elevadas velocidades de corte, garantindo a integridade superficial das peças a maquinar;**
- ? **Redução de operações manuais de acabamento final.**

Surge também como factor principal na definição de HSM o volume de apara produzido na unidade de tempo (taxa de remoção de material, *MRR – Material Removal Rate*).

A taxa de remoção de material (MRR) em fresagem, pode ser dada pela seguinte expressão:

$$MRR = \frac{a \cdot p \cdot l}{1000} \quad [\text{cm}^3/\text{min}] \quad (2.1)$$

Sendo a o avanço [mm/min]; p a profundidade de corte [mm]; l a largura de corte [mm].

Este conceito combina elevadas **velocidades de rotação** e de **avanço por dente**. Só com a combinação destes dois factores é possível maquinar a alta velocidade de forma eficiente.

Outros factores como os tempos mortos e o campo de aplicação conduzem a definições diferenciadas da HSM. A tabela 2.1 ilustra os quatro principais requisitos da HSM e as situações em que os mesmos se revelam mais importantes:

Tabela 2.1 Requisitos da Maquinagem a Alta Velocidade (*Kief, 1998*)

Requisitos	Situações de aplicação
? Redução de tempos de maquinagem, devido às elevadas velocidades de rotação e de avanço.	? Taxas elevadas de remoção de material ? Fabrico de componentes integrais em alumínio
? Redução das forças de maquinagem, devido às elevadas velocidades de rotação da árvore.	? Maquinagem de eléctrodos ? Componentes de paredes finas
? Evitar o sobreaquecimento da peça.	? Manter a integridade superficial da peça e o rigor dimensional
? Melhoria da qualidade superficial das peças.	? Reduzir ou eliminar operações de acabamento manual

Pelo que acaba de ser referido, pode concluir-se que não é consensual a eleição dos factores para encontrar uma definição de HSM. Em função das diferentes situações de maquinagem, há determinados factores que são predominantes. Mais importante que definir HSM é saber seleccionar as características da máquina e das ferramentas que permitam atingir os objectivos pretendidos com cada operação ou processo de fabrico.

Adaptando o conceito de produtividade a cada situação em concreto, pode aceitar-se como definição para alta velocidade: “*O conjunto de condições de maquinagem com as quais se obtém a máxima produtividade*”.

Essa produtividade poderá significar precisão dimensional, qualidade da superfície maquinada, elevada taxa de remoção de material, redução das operações de acabamento manual, ou outra característica considerada importante para o processo em causa.

2.3 Aplicações

A maquinagem a alta velocidade foi impulsionada e continua a ter a sua principal aplicação na indústria aeronáutica, indústria automóvel e de moldes e matrizes. A evolução do mercado e a competitividade tem alargado a sua utilização a outros tipos de indústrias como o fabrico de componentes ópticos e a produção de pequenas e médias séries de peças.

Destacam-se especialmente o fabrico de eléctrodos para electroerosão, peças de paredes finas e peças cuja complexidade e precisão não seriam possíveis de obter por outro processo. Na figura 2.3 são apresentados alguns dos exemplos obtidos em HSM. As imagens evidenciam a complexidade e a qualidade superficial obtida, que não seria possível sem a maquinagem a alta velocidade.

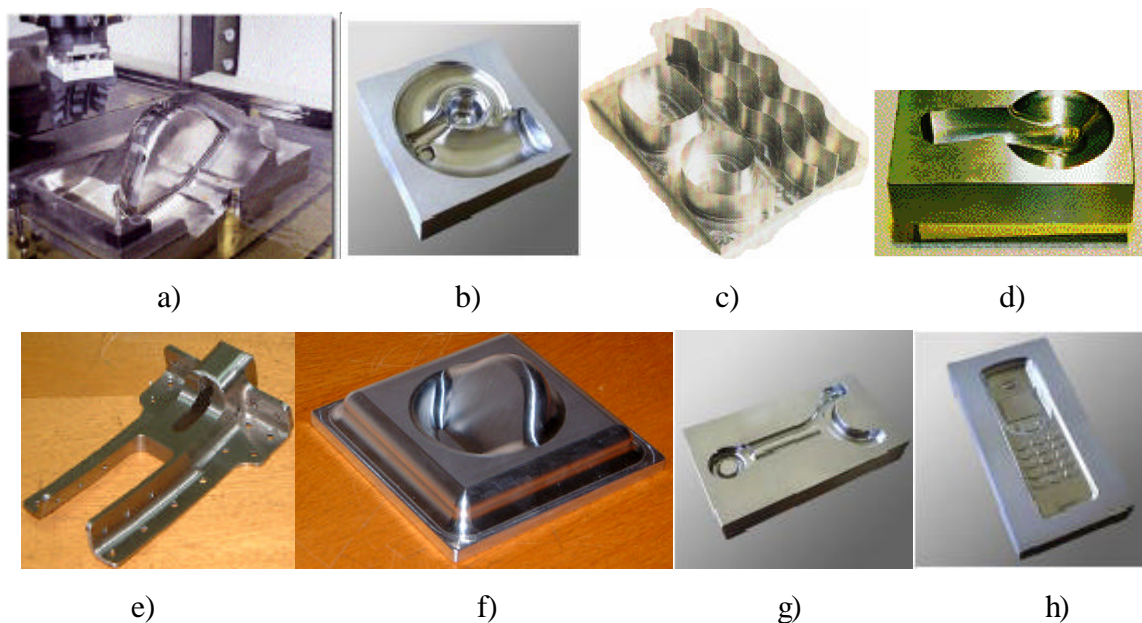


Figura 2.3 Exemplos de peças obtidas por maquinagem a alta velocidade¹:

- a) Molde e ferramenta de estampagem; b) Voluta; c) maquinagem de paredes finas; d) molde para auricular; e) bracket para Lockheed C130; f) postigo moldante; g) elemento de ligação; h) molde para telemóvel.

¹ a), e), f) Manuel Pousada, Herds.; b), g), h) Matsuura; c), d) Sandvik Coromant

2.4 Máquinas-Ferramenta de alta velocidade

As máquinas-ferramenta de alta velocidade devem satisfazer requisitos rigorosos do ponto de vista da fiabilidade dos seus componentes e das características construtivas. Assim, estas máquinas deverão cumprir condições essenciais, especificadas na tabela 2.2.

Tabela 2.2 Requisitos a que devem obedecer as máquinas-ferramenta de Alta Velocidade (*Kief, 1998*)

Requisitos das máquinas HSM	Problemas a evitar
? Rigidez e estabilidade elevadas	? Vibrações e eventual ressonância
? Árvores equilibradas com precisão e accionamento sem vibrações	? Rotura da ferramenta ou degradação da qualidade das superfícies maquinadas.
? Massas móveis reduzidas	? Acelerações/desacelerações baixas. (Estas máquinas deverão permitir acelerações superiores a 1,5g ($1g = 9,81 \text{ m/s}^2$)).
? Dispositivos de extracção de aparas eficazes	? Danificação das guias da máquina e das superfícies maquinadas.
? Condições de segurança elevadas para o operador	? Acesso do operador ao espaço de trabalho da máquina, com esta em funcionamento.

2.4.1 Aspectos construtivos

Para satisfazer as condições referidas na tabela 2.2, os fabricantes dispõem actualmente de meios tecnológicos sofisticados ao nível dos materiais, concepção, dimensionamento e construção das máquinas. Como complemento, dispõem também de uma vasta gama de componentes e acessórios capazes de dotar os equipamentos com desempenho elevado.

Com recurso ao método dos elementos finitos, é possível analisar os componentes, proceder à sua montagem e simular diferentes solicitações para determinar os pontos críticos. Esta análise permite otimizar o processo de construção da máquina-ferramenta.

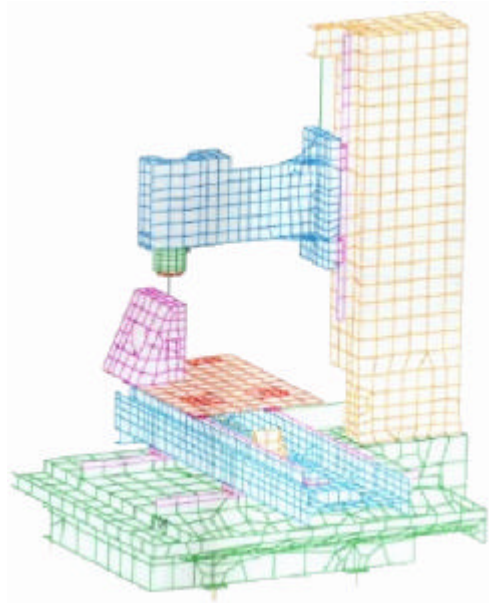


Figura 2.4 Exemplo de análise da estrutura com recurso a análise por elementos finitos¹

2.4.2 Elementos constituintes

De uma forma genérica, as máquinas-ferramenta CNC e em particular as dedicadas a HSM, são o resultado de uma integração equilibrada de várias vertentes tecnológicas. Podemos identificar nestas máquinas os seguintes elementos constituintes:

Estrutura:

- ? Componentes fixos: barramento e blindagem de protecção;
- ? Componentes móveis: mesa, cabeçote.

Grupo cinemático:

- ? Motores;
- ? Transmissões;
- ? Fusos.

Grupo de Controlo:

- ? Controlador;
- ? Sensores;
- ? Régua óptica;

¹ <http://www.cinmach.co.uk>

Acessórios:

- ? Armazém de ferramentas;
- ? Sistema de medição de ferramentas;
- ? Sistemas de centragem automática;
- ? Sistema de lubrificação interna da máquina;
- ? Extracção e filtragem de ar;
- ? Sistema de lubrificação/refrigeração;
- ? Sistema de remoção de aparas;
- ? Sistemas de alimentação de material.

2.4.2.1 Estrutura

A estrutura da máquina deve satisfazer *duas condições fundamentais*. Por um lado, deve *suportar os esforços gerados* no processo de corte e garantir a estabilidade da máquina. Por outro lado, deve *permitir o escoamento fácil das aparas* para a parte inferior, deixando livre a área de trabalho. Deverá também possibilitar a fácil realização das intervenções de manutenção.

No que respeita aos centros de maquinagem, podemos encontrar máquinas de diferentes dimensões e estrutura, de acordo com o tipo de trabalho que se pretenda realizar. No entanto, na maioria das aplicações, o que se pretende é essencialmente *versatilidade*. Neste enquadramento estão os centros de maquinagem verticais. Estes podem ser de dois tipos: de **mesa fixa** e de **mesa móvel**. A figura 2.5 ilustra os dois tipos de máquina.

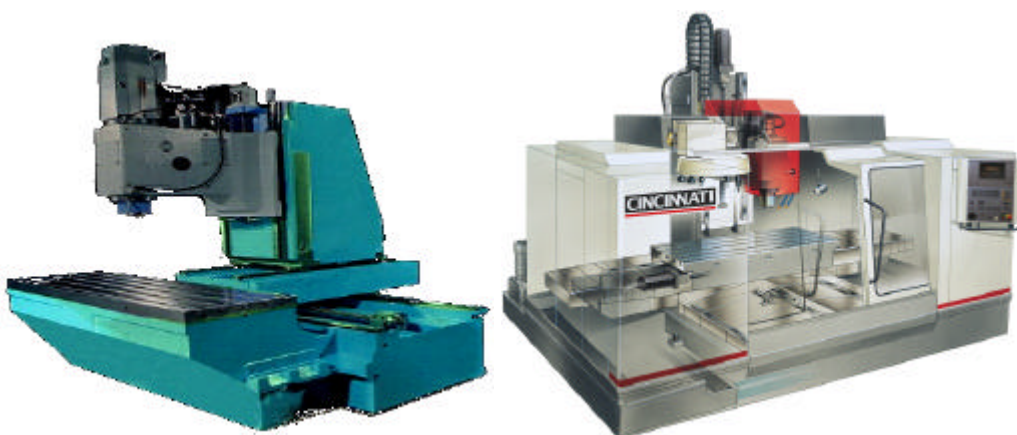


Figura 2.5 Centros de maquinagem de mesa fixa (à esquerda) e de mesa móvel (à direita)¹

¹ Cortesia M. Pousada, Herd.s – Representante Cincinnati em Portugal

As máquinas de **mesa fixa**, têm a vantagem de permitir a utilização de uma maior zona de trabalho, sendo por isso mais adequadas à maquinagem de peças de grandes dimensões como acontece com frequência na indústria de moldes. Permitem a colocação de cargas elevadas na mesa de trabalho, mantendo constante a inércia devida exclusivamente à aceleração/desaceleração dos componentes móveis da máquina.

A estrutura da base é em construção soldada nervurada, como ilustra a figura 2.6. Este tipo de construção permite absorver as solicitações dinâmicas resultantes dos movimentos e forças de corte.

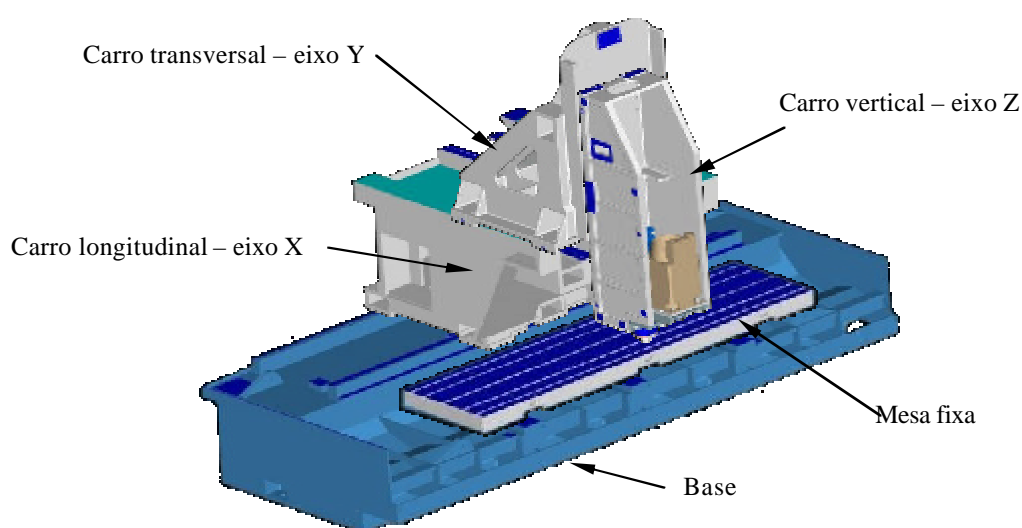


Figura 2.6 Estrutura de uma máquina de mesa fixa¹

Os carros longitudinal, transversal e vertical são construídos em ferro fundido. Esta opção permite uma melhor absorção das vibrações na zona de corte.

As máquinas de **mesa móvel**, apesar de uma zona de trabalho mais limitada, apresentam maior flexibilidade e maior capacidade de aceleração e desaceleração. Esta possibilidade deve-se à menor inércia proporcionada por massas móveis mais reduzidas.

A base da mesa móvel é em construção soldada, sendo a mesa em ferro fundido. Na figura 2.7 está representada uma mesa móvel.

¹ Cortesia M. Pousada, Herd.s – Representante Cincinnati em Portugal

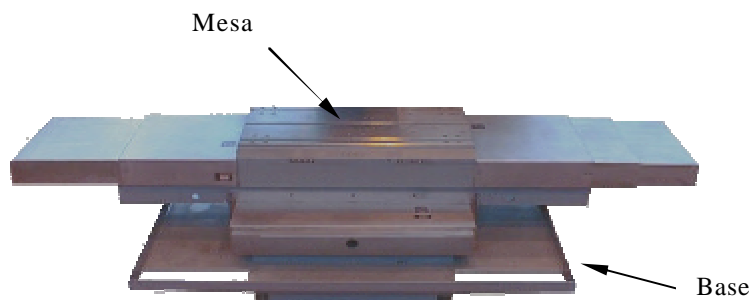


Figura 2.7 Mesa móvel (Cincinnati)¹

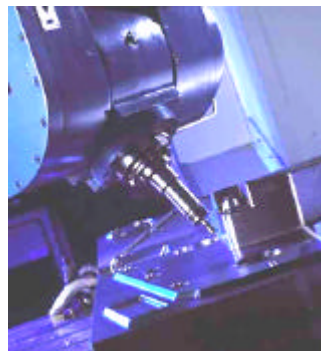
Este tipo de construção torna possível combinar a absorção de vibrações com a resistência mecânica.

O carro vertical é também construído em ferro fundido para minimizar o efeito das vibrações.

Como opção, estas máquinas podem ser equipadas com quatro e cinco eixos, que permitem capacidades de trabalho adicionais na maquinagem de geometrias complexas. Na figura 2.8, são apresentadas estas duas opções.



a) (Cincinnati)¹



b) (Fidia)²

Figura 2.8 a) 4º eixo ; b) 5º eixo

2.4.2.2 Grupo cinemático

Os componentes cinemáticos das máquinas de alta velocidade, asseguram a precisão de movimentos peça/ferramenta, de forma a conseguir a correcta correspondência entre a

¹ Cortesia M. Pousada, Herd.s – Representante Cincinnati em Portugal

² <http://www.mmsonline.com>

trajectória programada e a executada. Essa precisão de movimentos deve-se à utilização de motores com tempo de resposta adequado, acoplamentos aos fusos sem folgas e guias de elevada precisão.

A figura 2.9 mostra um sistema de guias lineares, equipadas com rolamentos lineares de esferas recirculantes autolubrificadas. A repetibilidade de movimentos com utilização deste sistema é da ordem de $\pm 1 \mu\text{m}$.

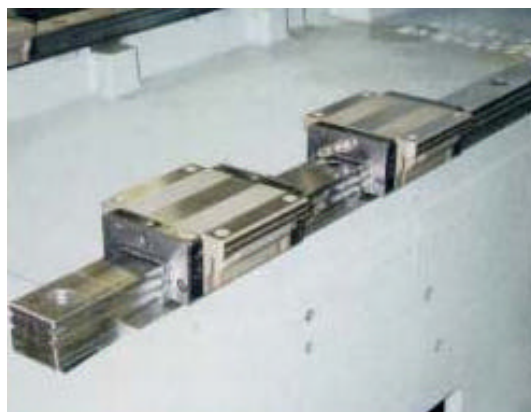


Figura 2.9 Guias lineares (*Fadal Machining Centers*¹).

Motores dos eixos

Os motores de accionamento dos eixos são em geral do tipo rotativo, acoplados directamente aos eixos. Recentemente têm sido utilizados motores lineares que permitem maiores acelerações.

Na figura 2.10 pode observar-se de forma simplificada, a diferença entre estes dois tipos de motores.

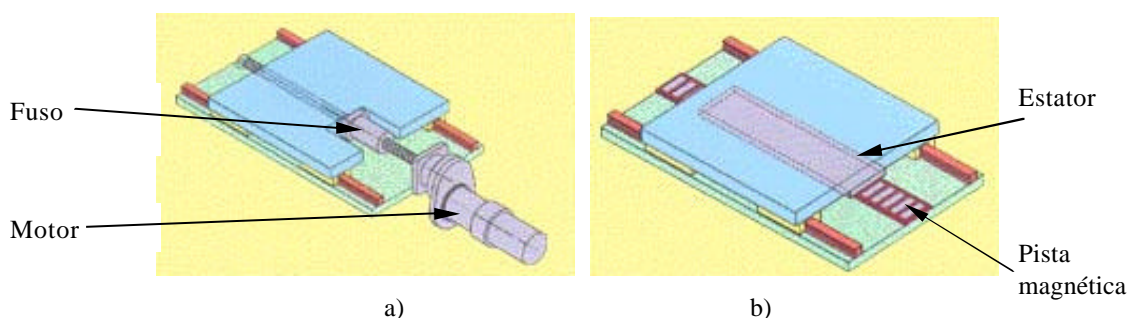


Figura 2.10 a) motor rotativo; b) motor linear¹

¹ <http://www.mmsonline.com>

A principal desvantagem dos motores lineares reside essencialmente no seu custo elevado.

Árvore principal

A elevada rotação da árvore da máquina, pode conseguir-se através de várias soluções construtivas. Uma delas consiste na transmissão de movimento por correias dentadas, a partir de um motor separado da árvore, como indicado na figura 2.11.

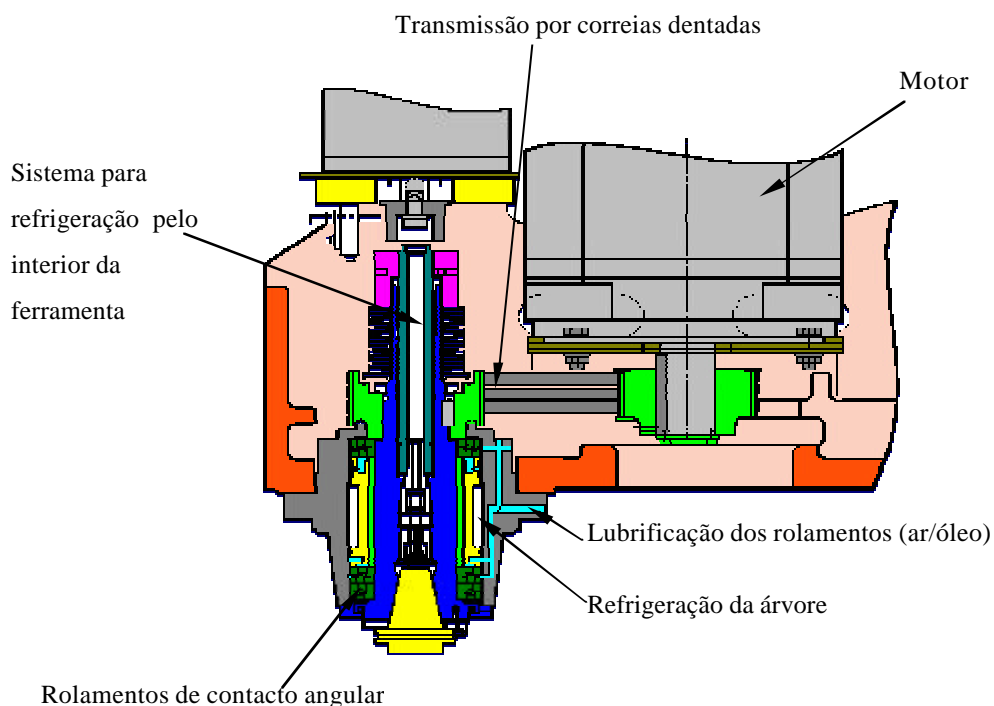


Figura 2.11 Árvore com accionamento por correias dentadas¹

Esta solução simplifica as operações de manutenção, e minimiza as fontes de geração de calor na árvore. Os rolamentos são lubrificados por uma mistura ar/óleo, a partir de um sistema central de lubrificação. A árvore é refrigerada mediante a circulação de um fluido para o efeito.

A solução mais usual para atingir elevadas rotações é a utilização de motores/árvore, como ilustra a figura 2.12.

¹ Cortesia M. Pousada, Herd.s – Representante Cincinnati em Portugal

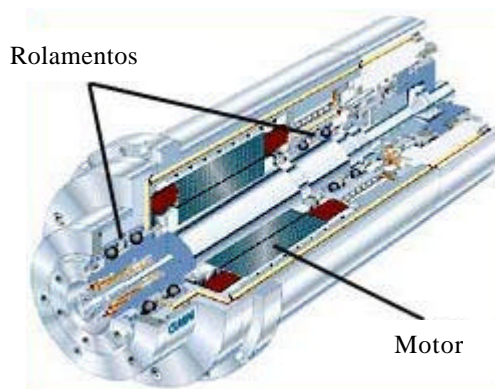


Figura 2.12 Árvore de alta velocidade (*GMN Spindles*¹)

A existência de rolamentos na árvore, compromete a sua rigidez quando se utilizam velocidades de rotação elevadas. Esta é uma das razões pela qual se usam pequenas profundidades de corte quando se utilizam estes motores.

Os rolamentos usados na construção destas árvores são de tipo híbrido, com esferas cerâmicas montadas em anéis de aço, como se ilustra na figura 2.13.

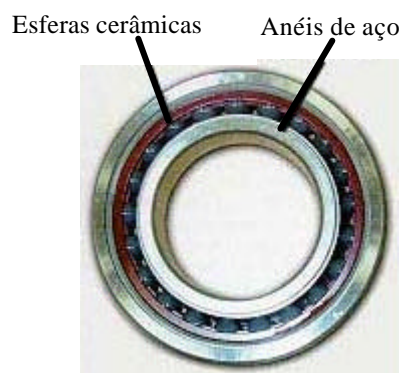


Figura 2.13 Rolamento híbrido de esferas cerâmicas (*Fadal Machining Centers*¹)

A utilização de esferas cerâmicas, permite maior estabilidade com rotações elevadas. Devido à massa mais reduzida das esferas, as vibrações por acção da força centrífuga são mais reduzidas. A vida útil deste tipo de rolamentos é também mais elevada.

A maioria das máquinas actualmente em funcionamento não dispõem das velocidades de rotação necessárias à maquinagem a alta velocidade. Recentemente têm surgido no mercado algumas alternativas com as quais se pretende encontrar uma solução intermédia

¹ <http://www.mmsonline.com>

entre a maquinagem convencional e a maquinagem a alta velocidade. São apresentadas, a título de exemplo, duas das soluções disponíveis. Na figura 2.14 pode observar-se um sistema amplificador de velocidade de rotação.



Figura 2.14 Sistema amplificador de velocidade (*Pibomulti*¹)

Trata-se de um processo amplificador de velocidade de rotação através de um sistema interno de engrenagens. O aumento de rotação é conseguido sacrificando o binário e perdendo curso de trabalho no eixo Z. A rotação máxima disponível com este dispositivo ronda as 20000 rpm.

Quando as operações de maquinagem são limitadas à utilização de ferramentas de pequeno diâmetro ($D=6\text{ mm}$), pode também recorrer-se a turbinas de alta rotação com accionamento a ar comprimido, como mostra a figura 2.15.



Figura 2.15 Turbina a ar comprimido (*Air Turbine Tools*²)

¹ <http://www.mmsonline.com>

² <http://www.airturbinetools.com>

Estas turbinas são de rotação fixa. Existem modelos no mercado com rotações que variam de 25000 a 60000 rpm. O facto de serem de rotação fixa, limita a sua utilização a operações que utilizem ferramentas de pequeno diâmetro com pequena profundidade de corte. A rotação é importante para manter a velocidade de corte dentro dos valores recomendados.

2.4.2.3 Grupo de controlo

Este grupo engloba todo o sistema de componentes com a função de *controlo* e *posicionamento* dos eixos e assegurar que todos os sistemas se encontram *operacionais*. Para o efeito as máquinas são equipadas com *régua óptica* e com um conjunto de *sensores* que enviam informações ao controlador sobre as condições de funcionamento e segurança. Essas informações referem-se por exemplo à alimentação de ar comprimido, abertura e fecho da porta de acesso à zona de trabalho e lubrificação interna da máquina. A fase de arranque da máquina inclui rotinas de verificação dos vários sistemas e posicionamento dos eixos. Normalmente são também instalados sensores de força nos eixos com a função de parar a máquina em caso de colisão. Na figura 2.16 pode observar-se um exemplo desta aplicação.

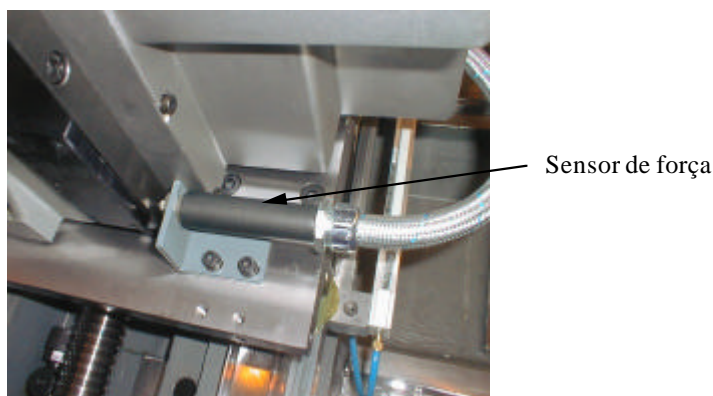


Figura 2.16 – Colocação de sensor de força¹

A maioria das máquinas actualmente existentes possuem um CNC de arquitectura aberta. A figura 2.17 ilustra este tipo de construção.

¹ Cortesia M. Pousada, Herd.s – Representante Cincinnati em Portugal

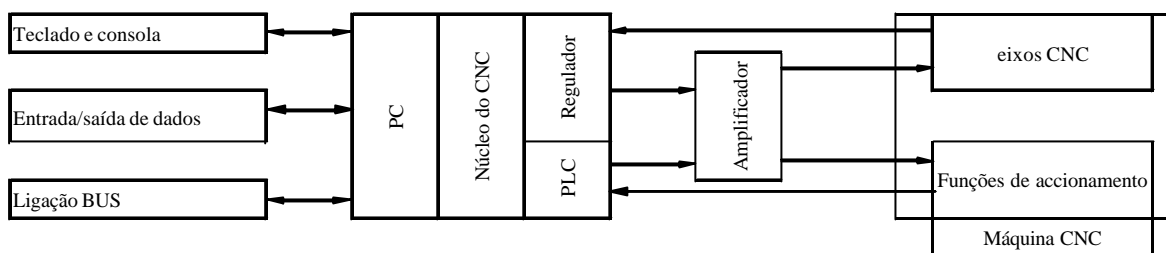


Figura 2.17 – CNC de arquitectura aberta (Kief, 1998)

Esta filosofia construtiva baseia-se na interposição de um PC entre os periféricos de entrada e saída de dados e o controlador. Desta forma torna-se mais fácil a instalação de periféricos e a comunicação do operador com o CNC. A comunicação através do PC, permite dispor de dispositivos “standard” como discos duros, drives de disquetes para entrada e armazenamento de dados e ligação em rede a outros computadores. A partir de uma localização distante é possível enviar ou receber informação e até realizar operações de manutenção e diagnóstico.

2.4.2.4 Acessórios

Apesar de não fazerem parte do equipamento “standard” das máquinas CNC, os acessórios representados na figura 2.17 podem aumentar de forma significativa a produtividade de uma máquina-ferramenta.

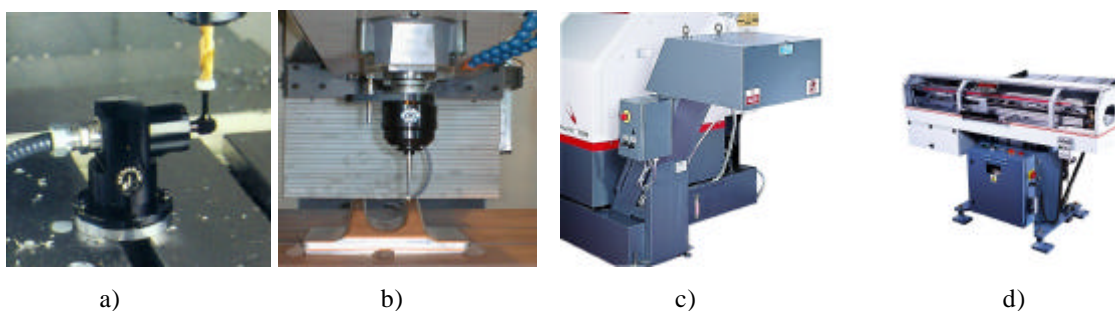


Figura 2.17 a) medidor automático de ferramentas; b) centrador automático; c) extractor de aparas; d) alimentador. (Cincinnati¹)

O aumento de produtividade é conseguido com a redução do tempo de preparação e paragem da máquina para realizar operações de limpeza e preparação do trabalho.

¹ Cortesia M. Pousada, Herd.s – Representante Cincinnati em Portugal

O *armazém de ferramentas* tem uma capacidade que varia entre as 20 e as 100 ferramentas. Quando as máquinas se destinam à realização de operações diversificadas é importante dispor do maior número de ferramentas possível. O modelo do armazém de ferramentas depende das opções construtivas dos vários fabricantes. As duas opções mais comuns são as representadas na figura 2.18.

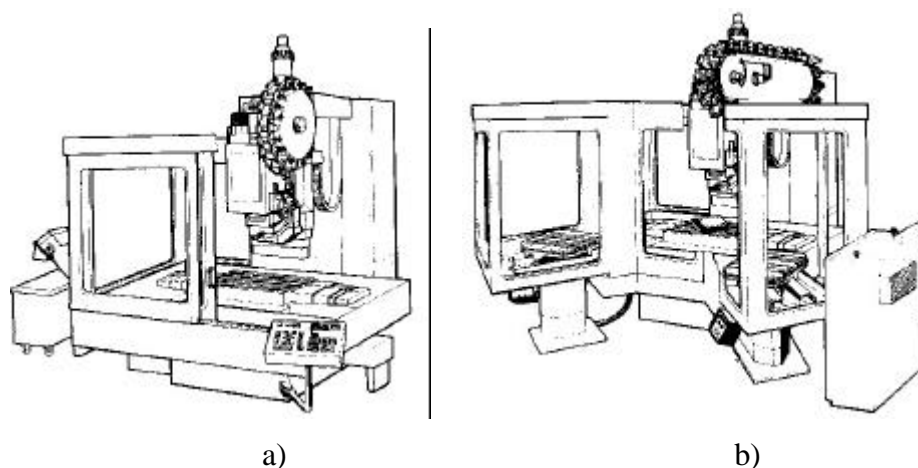


Figura 2.18 Opções principais do armazém de ferramentas: a) tambor rotativo; b) carrocel (Kief, 1998)

Quando uma máquina é integrada num sistema flexível de produção é necessário considerar também outros acessórios como por exemplo sistemas de transferência, manipuladores e sistemas de paletização.

Actualmente verifica-se uma grande aposta em máquinas mistas que conjugam operações de fresagem e de torneamento. São máquinas com dupla bucha de aperto e equipadas com ferramentas motorizadas. A combinação de operações de torneamento e fresagem sem que a peça mude de máquina, permite atingir ganhos de produtividade elevados.

2.5 Lubrificação/refrigeração

A maquinagem de materiais por processos que envolvam o arranque de aparas está associada a fenómenos de geração de calor. A figura 2.19 ilustra em esquema, o processo de corte por arranque de aparas.

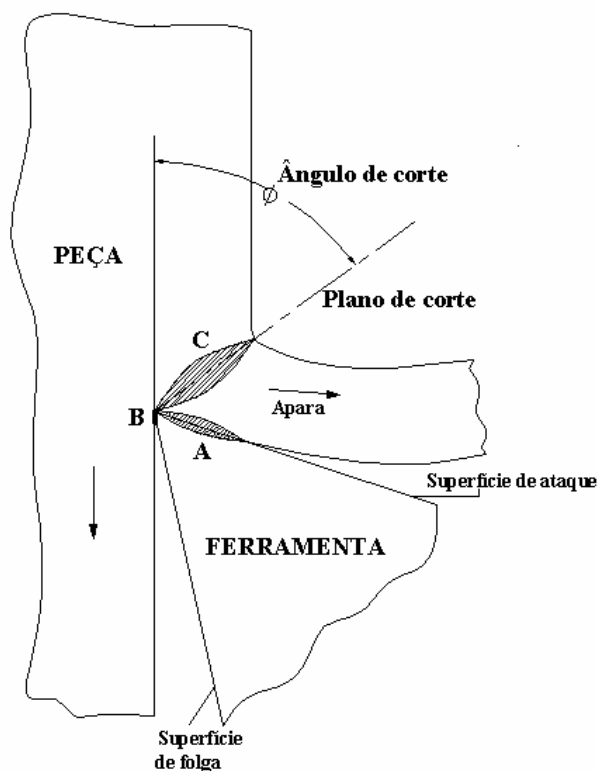


Figura 2.19 Fontes geradoras de calor na formação da apara

A deformação plástica do material (C), o atrito entre a apara e a superfície de saída (A) e entre a peça e a superfície de folga da ferramenta (B), contribuem para o aumento da temperatura na ferramenta, na apara e na peça. (*Ferraresi, 1990*).

O calor gerado é evacuado maioritariamente pela apara. Como a superfície de contacto da ferramenta com a apara é reduzida, atinge temperaturas bastante elevadas que poderão reduzir significativamente a sua vida útil.

Na peça a maquinar, as temperaturas desenvolvidas no corte podem causar alterações da camada superficial do material, modificando as condições de corte, podendo haver necessidade de um tratamento térmico de normalização de tensões das peças maquinadas.

A evolução da geometria e materiais das ferramentas e a utilização dos fluidos de corte vieram atenuar este problema. Os fluidos de corte apresentam as seguintes funções principais, segundo (*Machado et al, 2004*):

- ? **Lubrificar as zonas em que há atrito;**
- ? **Refrigerar a peça e a ferramenta;**
- ? **Remover a apara da zona de corte;**

A **função lubrificante** é de extrema importância. Na zona A (figura 2.18), ao reduzir-se o coeficiente de atrito entre a apara e a ferramenta (μ) reduz-se também a geração de calor. O mesmo acontece entre a ferramenta e a peça na zona B. A redução do coeficiente de atrito (μ), faz aumentar o ângulo de corte (ϕ) e reduz a taxa de deformação. Daqui resulta uma redução da energia de deformação na zona C, diminuindo o calor gerado. O aumento do ângulo de corte (ϕ) facilita a saída da apara (V_s). As expressões 2.1 (*Ernst e Merchant*) e 2.2 (*Davim, 1995*), ajudam à compreensão deste fenómeno:

$$\phi \approx 45^\circ - \frac{1}{2} \mu - \alpha \quad (2.1)$$

sendo α o ângulo de ataque e μ o coeficiente de atrito entre a apara e a ferramenta

A velocidade de saída da apara (V_s) pode ser obtida pela expressão:

$$V_s = V_c \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (2.2)$$

sendo V_c a velocidade de corte [m/min], α o ângulo de ataque e ϕ o ângulo de corte.

O aumento da velocidade de saída da apara diminui o tempo de transmissão de calor para a ferramenta, mantendo-se assim mais baixa a sua temperatura de funcionamento, aumentando a sua vida útil.

A **função de refrigeração** do fluido de corte consiste na remoção de calor da ferramenta de corte e da peça.

A vida útil da ferramenta está relacionada com a conservação da sua dureza a quente. O aumento da temperatura favorece o fenómeno de difusão entre o material da peça e da ferramenta. A ferramenta fica mais enfraquecida e inutiliza-se rapidamente. A expressão 2.3 (*Ferraresi, 1977*) traduz a vida útil da ferramenta (T) em minutos, em função da temperatura de corte t .

$$T t^n = K \quad (2.3)$$

sendo t a temperatura na interface apara-ferramenta em [°C] e n , K constantes que dependem dos materiais da ferramenta e da peça e dos parâmetros de maquinagem.

Em geral o valor de n é muito elevado, na ordem de 20 (*Ferraresi, 1977*). Um pequeno aumento da temperatura provocará uma redução assinalável da vida da ferramenta.

Relativamente à peça, podem ocorrer deformações provocadas por aquecimentos localizados que resultam numa precisão dimensional reduzida

A função de refrigeração afigura-se assim de grande importância no processo de corte.

A **remoção da apra** da zona de corte é também importantíssima. O esmagamento das aparas entre a peça e a ferramenta, pode causar danos irreparáveis no acabamento da superfície maquinada e na vida da ferramenta.

2.5.1 Utilização dos fluidos de corte na maquinagem a alta velocidade

A eficácia dos fluidos de corte depende principalmente das condições da sua aplicação. Os métodos de fabrico dos fluidos de corte e a utilização de aditivos, tornam possível a sua selecção para cada caso particular, permitindo melhor protecção para os equipamentos e para o operador (*Machado et al, 2003*).

Na maquinagem a alta velocidade o balanço energético na zona de corte altera-se substancialmente. O aumento da velocidade de escoamento da apra reduz o seu tempo de contacto com a ferramenta. Em consequência, as trocas de calor com a ferramenta são menores, aumentando as trocas de calor por convecção entre a apra e o meio ambiente.

O principal obstáculo que se levanta à utilização dos fluidos de corte na HSM é a sua penetração na interface apra/ferramenta. O fluido tem que vencer a contra corrente de apra que se vai formando e que impede a sua penetração. Por esta razão, os sistemas de lubrificação que equipam as máquinas possuem bombas com pressões de funcionamento superiores a 10 bar.

(*Horne et al, 1978*), citados por (*Machado et al, 2003*), realizou de ensaios com ferramentas transparentes de safira e demonstrou que o fluido de corte chega à interface apra/ferramenta pelas partes laterais, em vez de se movimentar contra o fluxo de apra.

2.5.2 Classificação dos fluidos de corte

Tradicionalmente, os fluidos de corte podem ser enquadrados em três categorias principais (Davim, 1995):

Óleos de corte puros;

Emulsões;

Fluidos gasosos

Os *óleos de corte puros* são habitualmente de origem mineral. Quando adicionados aditivos adequados assumem a designação de óleos de corte de extrema pressão (EP).

As *emulsões* são constituídas por óleo misturado em água. Esta possui boas propriedades refrigerantes mas deve ser devidamente tratada para não provocar a corrosão dos componentes metálicos da máquina. Os óleos usados nas emulsões podem ser de base mineral, mas os sintéticos são os mais utilizados.

Os *fluidos gasosos* usados na maquinagem apresentam sobretudo propriedades refrigerantes. Os mais utilizados são sobretudo o ar e o dióxido de carbono.

2.5.3 Selecção dos fluidos de corte

A grande variedade de marcas e de propriedades de fluidos de corte existentes no mercado, torna por vezes difícil a sua escolha. Há normalmente três factores fundamentais que condicionam a escolha de um fluido de corte (Machado et al, 2003):

- ? **O material da peça;**
- ? **O material da ferramenta;**
- ? **O processo de maquinagem.**

O **material da peça** condiciona a utilização dos fluidos de corte (Machado et al, 2003). Na maquinagem dos aços resistentes ao calor, aços inoxidáveis e ligas de níquel, titânio e cobalto desenvolvem-se temperaturas bastante elevadas. Nestes casos a utilização de fluido de corte é importante para prolongar a vida da ferramenta e evitar alteração da camada superficial do material maquinado.

No caso do ferro fundido cinzento a apara é fragmentada. Uma das funções importantes do fluido de corte é a remoção da apara.

Nas ligas não ferrosas, como as de alumínio e de magnésio, os fluidos de corte a utilizar não podem conter enxofre livre porque este ataca o metal. As ligas de magnésio devem ser maquinadas a seco. A utilização de emulsões poderia tornar-se perigosa. A água ao reagir com a apara liberta hidrogénio, podendo causar explosões.

As ligas de cobre apresentam diferentes comportamentos conforme os elementos que compõe cada uma delas. Os latões que contêm chumbo, apresentam grande ductilidade e são por isso fáceis de maquinar. O maior problema destas ligas é a formação de apara aderente. Daí que a função lubrificante seja a mais importante para evitar este fenómeno.

Os **materiais usados no fabrico das ferramentas** para maquinar a alta velocidade, estão sujeitos a altas temperaturas, devendo conservar sua dureza nestas condições. Daí que se utilizem essencialmente ferramentas de metal duro e cerâmicas. Estas ferramentas são utilizadas para maquinar a seco. A utilização de fluidos de corte poderia originar choques térmicos e provocar a fissuração do material da ferramenta.

As ferramentas à base de nitreto de silício (Si_3N_4) são mais resistentes a este fenómeno do que as fabricadas à base de alumina (Al_2O_3). Na maquinagem de superligas, normalmente são utilizadas as ferramentas de materiais ultra duros (diamante policristalino – PCD e nitreto de boro cúbico – CBN). Estes materiais resistem bem aos choques térmicos e permitem por isso a utilização de fluidos de corte.

A **diversidade dos processos de maquinagem** dificulta por vezes a escolha do fluido de corte. Um centro de maquinagem vertical por exemplo, pode maquinar peças em aço, alumínio ou qualquer outro material. As ferramentas a utilizar devem também ser adequadas a cada caso específico. A capacidade do reservatório do fluido de corte das máquinas é considerável, sendo na generalidade dos casos superior a 100 litros para máquinas de média dimensão.

Neste leque de variáveis, escolher um fluido de corte que simultaneamente não reaja com o material a maquinar, seja compatível com a ferramenta e não ataque os componentes da máquina, pode não ser tarefa fácil. Atendendo à grande quantidade de marcas existentes no

mercado, convém optar por uma marca que garanta a qualidade do produto e forneça a ficha técnica do mesmo.

2.5.4 Aspectos ecológicos relacionados com a lubrificação. Lubrificação mínima

Desde o início do séc. XX que os processos de produção começaram a ser desenvolvidos e sistematizados cientificamente (*Sokovic et al, 2001*). Contudo, a introdução de materiais, energia e novos processos de fabrico entraram em choque com as questões ambientais, devido à produção de resíduos resultantes dos vários processos industriais. Este fenómeno foi-se agravando e surgiram na segunda metade do séc. XX as organizações ambientalistas a alertar para a gravidade da situação.

A onda crescente de contestação, gerou uma consciência global sobre a necessidade de controlar a emissão de poluentes. As várias acções desenvolvidas incidem na procura de novos métodos de fabrico, na implantação de planos de racionalização energética e utilização de produtos biodegradáveis e recicláveis.

Embora as medidas a tomar encontrem alguma resistência devido aos custos económicos da sua implementação, assiste-se já a algumas soluções que convém assinalar. Os fabricantes de ferramentas, (a Sandvik, por exemplo) têm programas de recolha das ferramentas usadas, evitando desta forma o tratamento indiferenciado destes resíduos.

Os efluentes líquidos constituem um dos principais factores de poluição industrial. A utilização de líquidos de corte requer por isso uma reflexão importante, para se encontrarem formas de reduzir ou eliminar as suas emissões poluentes.

Uma das formas de eliminar os efeitos causados pelos fluidos de corte seria evitar a sua utilização. No entanto, apesar dos estudos já desenvolvidos nesta área, os líquidos de corte continuam a assumir um aspecto importante na maioria das situações de maquinagem. A sua eliminação conduziria a um desgaste acelerado das ferramentas de corte e à obtenção de peças de má qualidade e consequente rejeição.

Com a tecnologia actualmente disponível, é possível minimizar os efeitos poluentes dos fluidos de corte recorrendo a processos de reciclagem. No entanto, os custos associados são sempre muito elevados. Além do equipamento necessário para efectuar a reciclagem, a sua eficácia está dependente de uma correcta triagem dos resíduos.

Por estas razões, será pertinente concluir que o grande esforço deve ser canalizado no sentido de evitar poluir, ou poluir o menos possível. Para isso, é necessário otimizar a geometria das ferramentas de corte, os materiais utilizados e os processos de lubrificação/refrigeração. A utilização de óleos de corte biodegradáveis e a utilização de quantidades mínimas de lubrificante, são duas soluções actualmente em grande expansão.

2.5.4.1 Métodos de aplicação dos fluidos de corte

Dependendo dos materiais e ferramentas utilizadas, a evolução dos processos de maquinagem e a utilização dos fluidos de corte deve evoluir nas seguintes vertentes (Sokovic *et al*, 2001):

- ? **Maquinagem a seco (sem qualquer fluido de corte);**
- ? **Utilização de quantidade mínima de lubrificante;**
- ? **Utilização de ferramentas com revestimentos duros;**
- ? **Utilização de fluidos de corte ecológicos biodegradáveis.**

O diagrama da figura 2.20 apresenta a actual tendência evolutiva dos processos de lubrificação/refrigeração.

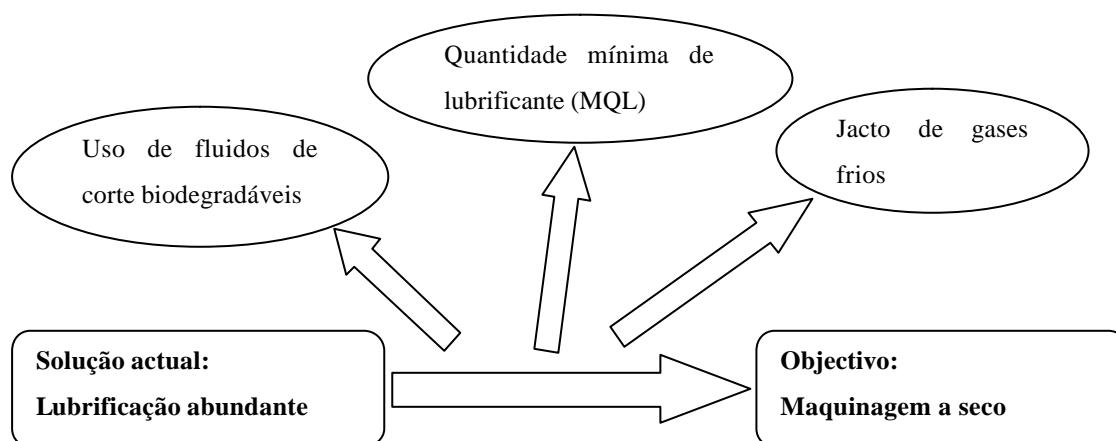


Figura 2.20 Processos de lubrificação/refrigeração (Kelly *et al*, 2002)

2.5.4.2 Utilização de quantidade mínima de lubrificante (MQL)

Como foi dito anteriormente, não é possível, por enquanto, eliminar completamente a utilização dos fluidos de corte na maioria dos processos de maquinagem. Convém por isso

analisar com mais pormenor aquela que poderá ser considerada uma solução de compromisso entre a lubrificação a seco e a lubrificação abundante.

Trata-se da utilização de quantidades mínimas de lubrificante – MQL (*Minimal Quantity of Lubricant*). Vários estudos realizados têm demonstrado as vantagens da utilização deste método de lubrificação.

(*Rahman. et al*), realizou testes usando provetes de aço de dureza 35 HRc com uma fresa de 20 mm de diâmetro com pastilhas de carbonetos (ISO P20). Entre outras conclusões, verificou que as *forças de corte foram mais reduzidas* com o processo de MQL, a *rugosidade média* obtida foi *semelhante* à da lubrificação abundante e *melhor* que a da maquinagem a seco. Não foram encontradas diferenças consideráveis relativamente à forma da apara no processo com MQL e com lubrificação abundante.

(*Braga et al, 2002*), realizou testes de furação de uma liga Alumínio/Silício (7%) usando brocas de metal duro integral ISO K10 não revestidas, tendo observado que os furos obtidos com MQL apresentavam uma qualidade superficial (*Ra*) semelhante ou melhor que os obtidos com lubrificação abundante. O desgaste do flanco da ferramenta foi semelhante nos dois casos, o que prova a viabilidade da utilização de MQL.

2.5.4.3 Técnicas para aplicação da lubrificação mínima

O princípio básico de funcionamento do sistema MQL, consiste no arrastamento de uma pequena quantidade de lubrificante por uma corrente de ar que é injectado na zona de corte. Esse arrastamento provoca a atomização do lubrificante, fazendo com que a sua distribuição na zona de corte seja uniforme.

A introdução do fluido de corte pelo interior da árvore da máquina, é sem dúvida o processo que resulta mais eficaz. A figura 2.21 ilustra este método.

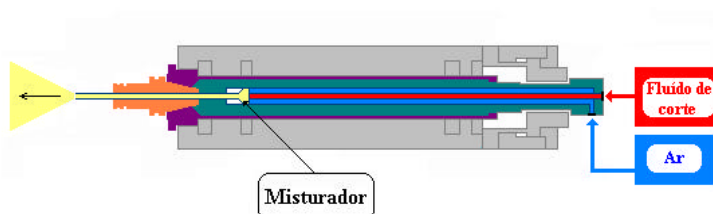


Figura 2.21 Mistura do fluido de corte e ar no interior da árvore da máquina¹

¹ www.horkos.co.jp

A utilização deste método apresenta também alguns inconvenientes. As aparas produzidas durante o corte, são projectadas em todas as direcções dentro do espaço de trabalho da máquina, em vez de arrastadas, como acontece com a lubrificação abundante. Quando se trata de grandes séries de peças, a acumulação de aparas pode constituir um problema. As figuras 2.22 e 2.23 apresentam duas soluções para o resolver.

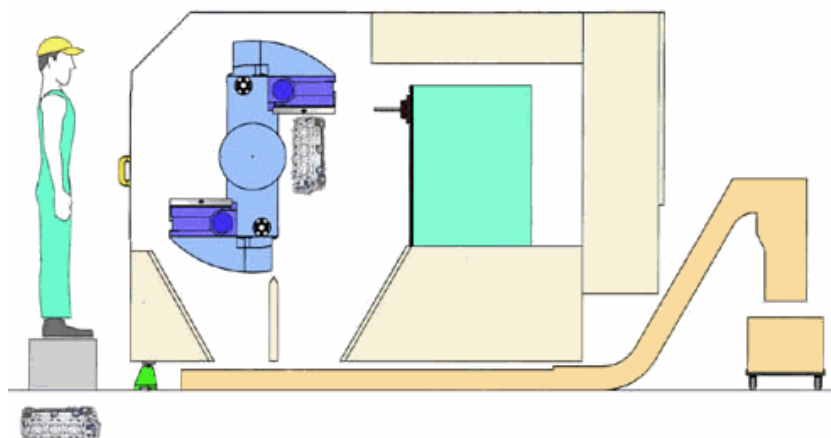


Figura 2.22 Queda das aparas por gravidade¹

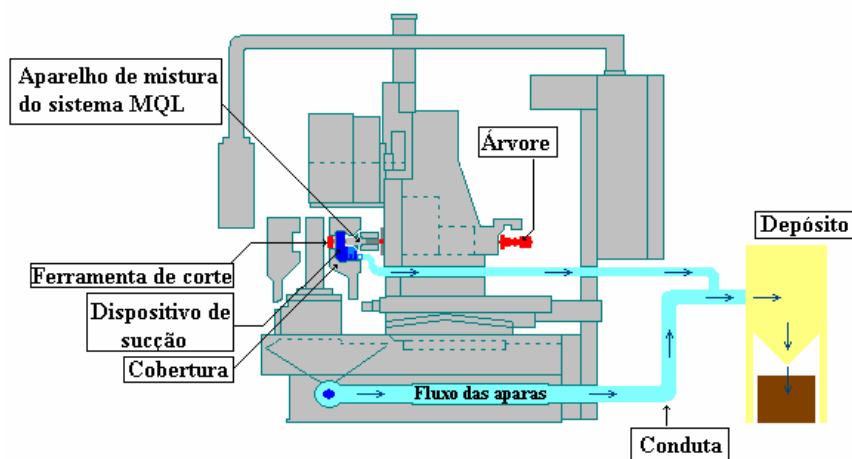


Figura 2.23 Aspiração das aparas¹

Na figura 2.22 pode observar-se uma concepção de máquina em que as aparas caem por gravidade na zona inferior do espaço de trabalho. Posteriormente são transportadas para o exterior através de um sistema mecânico.

¹ www.horkos.co.jp

Na figura 2.23, as aparas são aspiradas da zona de corte e transportadas para o exterior.

2.5.4.4 Considerações técnico/económicas sobre a lubrificação com MQL

Os estudos até agora realizados têm revelado vantagens na utilização desta técnica. A qualidade superficial das peças maquinadas, a duração das ferramentas e as vantagens ecológicas, são aspectos importantes a considerar.

A sua adaptação a máquinas já existentes apresenta alguns problemas. Com a aplicação desta técnica, gera-se no espaço de trabalho da máquina uma nuvem de gotículas resultante da pulverização da mistura. Este facto obriga à existência de uma vedação estanque do espaço de trabalho e à instalação de um sistema de extracção dos vapores formados. Caso contrário, o operador corre o risco de inalar esses vapores, que podem causar consequências graves a nível respiratório. Na figura 2.24, está representado um dos modelos de filtro para este efeito.



Figura 2.24 – Filtro de extracção para aplicação em máquinas-ferramenta¹

Apesar de se alegar que na lubrificação abundante há o contacto directo do operador com as superfícies húmidas da peça, havendo o risco de dermatoses, esse risco não é inexistente no caso da lubrificação mínima. Devido à quantidade de lubrificante aplicada, haverá sempre alguns resíduos sobre a peça no final da maquinagem. Daí que, o contacto do operador com a peça continue a ter riscos associados. Este problema só se resolve com a utilização de meios de protecção adequados (utilização de luvas, por exemplo).

¹ Cortesia do representante em Portugal, “Vista – Representações, Lda”

É também usual estabelecer custos comparativos entre a lubrificação abundante e a lubrificação mínima. A figura 2.25 é um dos exemplos.

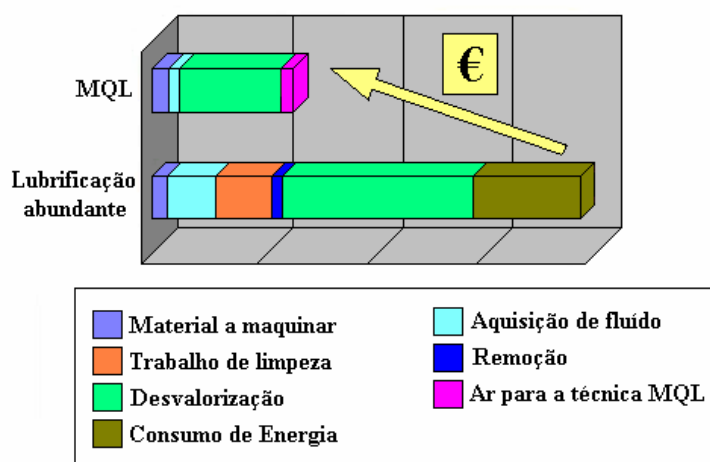


Figura 2.25 Custos comparativos entre a utilização de lubrificação abundante e da lubrificação mínima¹

A figura 2.25 revela as vantagens económicas da utilização de lubrificação mínima. Quanto aos custos de desvalorização do lubrificante, na lubrificação mínima a desvalorização é imediata, porque o fluido é removido quase na totalidade com as aparas. Com a lubrificação abundante, essa desvalorização é mais gradual, devido à reutilização do fluido de corte.

Há também uma outra função que é esquecida nesta análise. Os fluidos de corte deverão proporcionar uma função protectora aos componentes metálicos da máquina. Esta função é mais difícil de conseguir com quantidades reduzidas de lubrificante.

O que convém reforçar fundamentalmente, são as vantagens tecnológicas em termos de resultados obtidos com a lubrificação *MQL*. Relativamente aos restantes factores, não há um consenso sobre as inequívocas vantagens deste processo. Apesar de tudo, ele constitui uma alternativa viável e a ponderar na generalidade dos processos de maquinagem.

Como regra geral pode dizer-se que a lubrificação abundante deve ser usada apenas quando é importante proteger a ferramenta e/ou a peça.

¹ www.horkos.co.jp

2.6 Ferramentas de corte

2.6.1 Materiais

As ferramentas de corte têm sofrido uma evolução contínua nos últimos anos. Em certa medida, essa evolução deveu-se às exigências de maquinagem resultantes do desenvolvimento de novos materiais, especialmente os aços endurecidos, as ligas leves e os compósitos.

As ferramentas de *metal duro integral*, são normalmente preferidas por estarem sujeitas a menores desequilíbrios que as de pastilhas amovíveis. No entanto, neste último caso, tem havido evoluções importantes no fabrico destas ferramentas. A *Sandvik*[®] apresenta, para a maquinagem de materiais não ferrosos, uma fresa com o corpo em alumínio (figura 2.26) que utiliza pastilhas amovíveis.

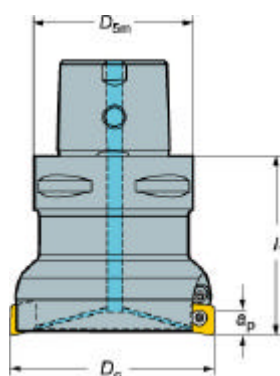


Figura 2.26 Fresa com corpo em alumínio para maquinagem de alumínio¹

Como o alumínio é um material de baixa densidade, a instabilidade provocada pela força centrífuga é muito mais reduzida caso existam desequilíbrios.

Apesar das razões apresentadas, as ferramentas de metal duro integral continuam a ter uma resposta mais favorável numa maior gama de rotações. Fabricadas com diâmetros que variam de 0,4 até 25 mm e com diferentes geometrias, permitem maquinar todo o tipo de materiais, inclusivamente os de elevada dureza.

Dependendo da natureza das operações a executar, as ferramentas são submetidas a choques frequentes. O comportamento das ferramentas de metal duro é condicionado fundamentalmente pelo tamanho de grão.

¹ Sandvik – Coroguide-2003-2

Na figura 2.27 pode observar-se a relação entre o tamanho de grão e a evolução da dureza e tenacidade.

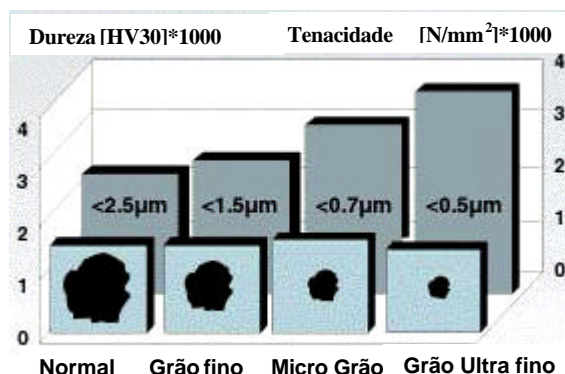


Figura 2.27 Relação entre o tamanho de grão, dureza e tenacidade das ferramentas de carbonetos (Ghuring)¹

Como se pode verificar pela figura 2.27, a tenacidade da ferramenta aumenta com a redução do tamanho do grão. Quanto à dureza, a sua variação é pouco significativa, registando-se uma ligeira redução do seu valor para o grão ultra fino (<0,5 µm).

2.6.2 Revestimentos

Na maquinagem a alta velocidade, especialmente quando se trata de materiais endurecidos, são geradas temperaturas elevadas na zona de corte. Neste caso, a ferramenta deve possuir boas propriedades mecânicas e mantê-las a temperaturas elevadas.

O revestimento de TiAlN (nitreto de alumínio-titânio) constitui uma barreira térmica à progressão do calor através da ferramenta. Outra propriedade deste revestimento é a sua resistência à abrasão. Por estas razões, este revestimento é o indicado para maquinagem a seco.

Uma solução mais económica é o revestimento de TiCN (Carbonitreto de Titânio). Esta solução é a mais indicada quando a velocidade e a dureza dos materiais a maquinar são moderadas. Neste caso, a utilização de lubrificação beneficia o processo de maquinagem.

Quando se trata de ligas de alumínio, o problema da ferramenta não é a temperatura atingida mas sim o escoamento da apra. Por essa razão, não se justifica a utilização de

¹ <http://www.mmsonline.com>

ferramentas revestidas. A tabela 2.3 resume a utilização dos diferentes tipos de revestimentos em várias aplicações

Tabela 2.3 Revestimentos e suas aplicações (MilStar)¹

Símbolo	Designação	Materiais a maquinar
TiN	Nitreto de titânio	Grafite e alumínio
TiCN	Carbonitreto de titânio	Aços com dureza inferior a 42 HRc,
TiAlN	Nitreto de alumínio-titânio	Aços com dureza superior a 42 HRc
ZrTiN	Nitreto de Zircónio e Titânio	Alumínio e grafite
Diamante	Diamante	Grafite

2.6.3 Geometria

Na maquinagem a alta velocidade, devido aos choques, a aresta de corte deve ser mais reforçada. Esse reforço consegue-se utilizando ferramentas com raio de ponta, ou de topo esférico. É também usual realizar um pequeno chanfro na extremidade da aresta de corte, conforme se ilustra na figura 2.28.

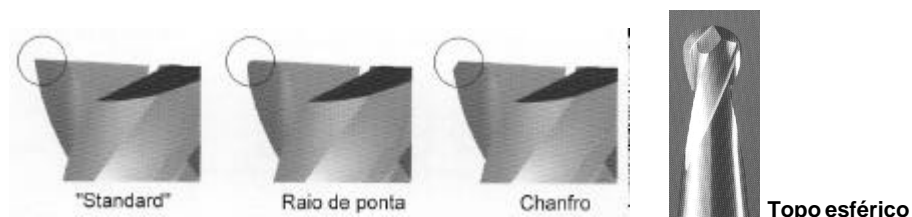


Figura 2.28 Diferentes tipos de aresta de corte nas ferramentas de metal duro (Van Hoorn^{® 2})

A utilização de raio de ponta ou de um pequeno chanfro reduz a componente radial da força de corte, conseguindo-se uma maior estabilidade da ferramenta.

A especialização dos fabricantes permite dispor actualmente de ferramentas com geometria específica a cada tipo de operação particular. O tradicional agrupamento dos materiais em três classes: **P** para os **aços**, **M** para os **aços inoxidáveis** e **K** para o **ferro fundido e materiais não ferrosos**, é agora mais alargado. Surgiram classes específicas para os **aços de elevada dureza (H)**, as **ligas resistentes ao calor (S)** e **alumínio (N)**.

¹ <http://www.mmsonline.com>

² www.hoorn-carbide.com

Na maquinagem de ligas leves como o alumínio, a ferramenta de corte deverá permitir o escoamento rápido da aparas. Por essa razão são normalmente utilizadas ferramentas com três ou de preferência duas arestas de corte. O espaço livre entre as arestas permite o escoamento fácil das aparas.

No caso dos aços, a utilização de ferramentas com quatro, seis ou oito arestas de corte resulta mais favorável. Nestes casos, o principal problema reside nos choques a que a ferramenta está sujeita. A utilização de um maior número de arestas de corte permite uma distribuição mais uniforme dos esforços gerados no corte.

2.7 Fixação das ferramentas

Na maquinagem a alta velocidade, são muitas as exigências ao nível da ferramenta de corte. O mínimo desequilíbrio da ferramenta por acção da força centrífuga, pode ter consequências graves imediatas. Essas consequências podem manifestar-se através da rotura ou inutilização da ferramenta e na má qualidade no acabamento das superfícies maquinadas.

O desequilíbrio da ferramenta manifesta-se através do batimento radial – *TIR* (*Total Indicator of Runout* ou indicador de batimento radial). Este parâmetro é definido como o desvio da ferramenta da sua linha de eixo, relativamente à espessura da aparas, em percentagem¹. A figura 2.29 mostra a influência do batimento radial na vida da ferramenta.

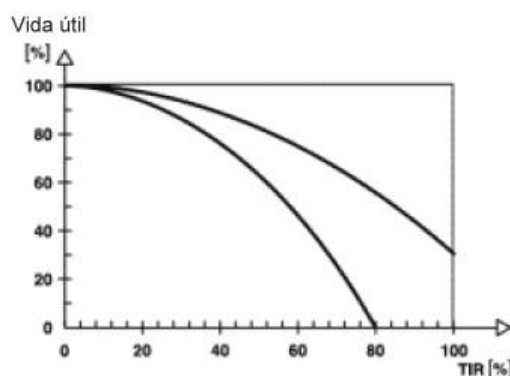


Figura 2.29 Vida útil da ferramenta em função do *TIR*¹

¹ www.sandvik.com

A figura 2.30 mostra também a influência do batimento radial no acabamento superficial. Pode observar-se um aumento da profundidade do perfil de rugosidade.

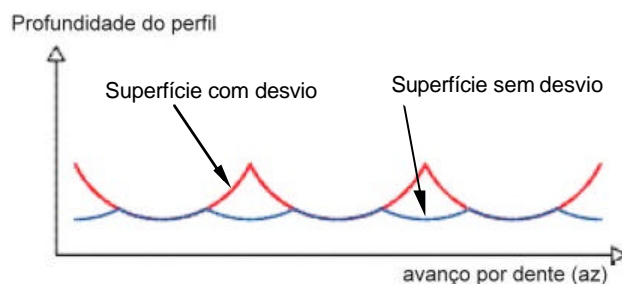


Figura 2.30 Aumento da profundidade do perfil de rugosidade devido ao batimento radial¹

A fixação das ferramentas é um dos factores mais importantes para garantir a estabilidade do processo de maquinagem e o consequente rigor dimensional e qualidade das superfícies. Como regra de selecção, no que respeita à estabilidade, pode dizer-se que *quanto maior for a rotação, mais curta deve ser a ferramenta*.

O sistema de fixação deve permitir a estabilidade da ferramenta em qualquer regime de rotações.

O suporte da ferramenta é habitualmente de dois tipos fundamentais: *SK* e *HSK*². A diferença entre estes dois tipos de suportes, reside no seu comprimento e na forma como encaixam na árvore da máquina. A figura 2.31 evidencia as diferenças entre estes dois tipos de cone.

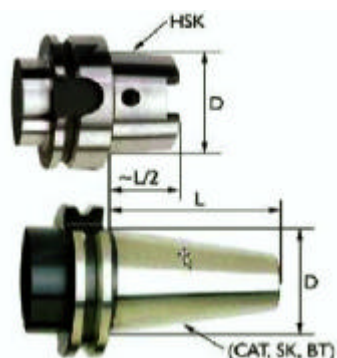


Figura 2.31 Diferenças geométricas entre os cones HSK e SK³

¹ www.sandvik.com

² Tradução da designação original alemã (Hohlschaftkegel) para inglês: “Hollow Taper Shank”

³ www.dynospindles.com

O suporte *SK*, apresenta maior comprimento e o contacto com a árvore da máquina faz-se ao longo da geratriz do cone. O suporte *HSK* é consideravelmente mais curto que o *SK*. Além do contacto ao longo da geratriz, contacta de topo com a árvore da máquina. Como resultado, os cones *HSK* apresentam uma maior rigidez radial e axial.

2.7.1 Equilíbrio dos cones para maquinagem a alta velocidade¹

Foi já referida na secção 2.4, a estabilidade da ferramenta assume grande importância no processo de corte e no acabamento superficial. O porta-ferramenta tem por isso um papel fundamental na estabilidade dinâmica durante o processo de corte, especialmente com rotações elevadas.

A geometria dos cones apresenta algumas assimetrias que implicam uma distribuição desequilibrada da sua massa. Ao rodar, o eixo de inércia do cone não coincide com o eixo de rotação. Diz-se então que o cone está desequilibrado.

Quando se verifica a situação ilustrada na figura 2.32, a força criada pelo desequilíbrio é igual em ambos os apoios das extremidades e a posição angular do vector força é também a mesma para os apoios. Este tipo de desequilíbrio é designado por **desequilíbrio estático**.

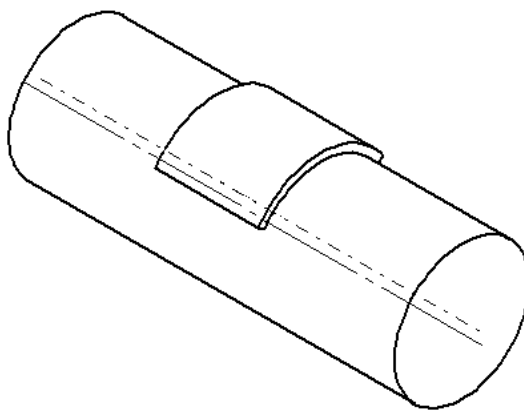


Figura 2.32 Desequilíbrio Estático

Noutra situação representada na figura 2.33 o eixo de rotação não coincide com o eixo geométrico, mas passa pelo centro de gravidade. As massas que provocam o desequilíbrio são diametralmente opostas. Trata-se de uma situação de **desequilíbrio conjugado**.

¹ De acordo com a publicação de Michael Layne, Product Manager – Universal Applications, American Hofmann Corp. “*Detecting and correcting unbalance in toolholders for High speed Machining*”

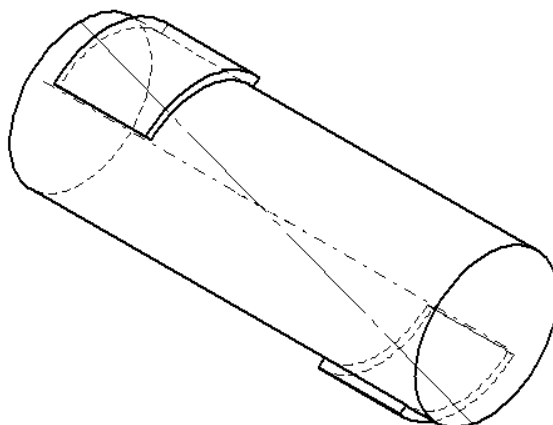


Figura 2.33 Desequilíbrio conjugado

Os vectores força criados por este desequilíbrio são iguais em ambas as extremidades mas desfasados de 180° no que respeita à sua direcção.

Quando o eixo geométrico não coincide, não é paralelo e não intersecta o eixo de rotação, cria-se uma situação de desequilíbrio dinâmico, como ilustra a figura 2.34.

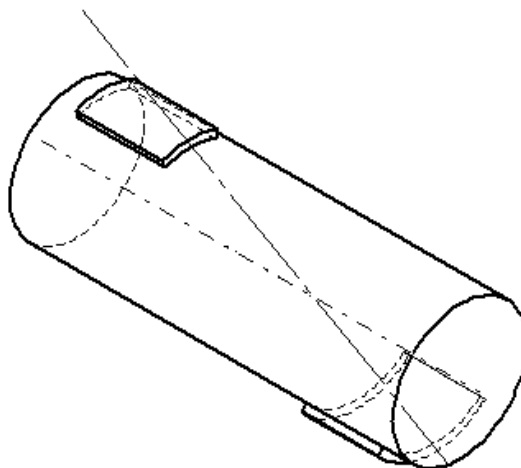


Figura 2.34 Desequilíbrio dinâmico

Este desequilíbrio é também designado por **desequilíbrio em dois planos** e combina as duas situações de desequilíbrio anteriores.

A figura 2.35 representa graficamente um rotor com uma massa em desequilíbrio.

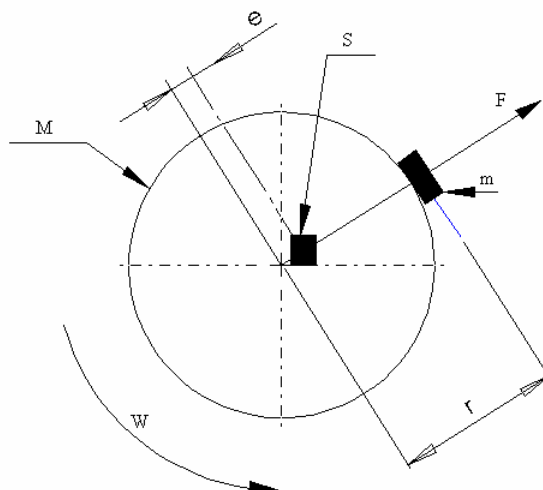


Figura 2.35 Rotor em desequilíbrio

Na figura 2.35, M representa a massa do rotor; S – Centro de massa; e – deslocamento do centro de massa (excentricidade); r – distância do centro do rotor ao centro de gravidade da massa em desequilíbrio; ω – velocidade angular; m – massa em desequilíbrio.

O desequilíbrio “ U ” pode determinado por uma das seguintes expressões:

$$U = M \cdot e, \text{ ou } U = m \cdot r \quad [\text{kg.m}] \quad (2.4)$$

sendo M a massa do rotor [kg]; e a excentricidade [m]; m a massa em desequilíbrio [kg] e r a distância do centro do rotor ao centro de gravidade da massa em desequilíbrio [m].

A força centrífuga “ F ” produzida pela massa em desequilíbrio é dada pela expressão:

$$F = U \cdot \omega^2 \quad [\text{N}] \quad (2.5)$$

sendo ω a velocidade angular e U o desequilíbrio.

Por seu lado, a velocidade angular é determinada pela expressão:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} \quad [\text{rad/s}], \text{ sendo } n \text{ a velocidade de rotação [rpm]} \quad (2.6)$$

Combinando as expressões 2.4, 2.5 e 2.6, obtém-se a seguinte expressão para o valor da força centrífuga:

$$F = m \cdot r \cdot \left(\frac{2\pi \cdot n}{60} \right)^2 \quad [\text{N}] \quad (2.7)$$

A expressão 2.7 permite concluir que a força centrífuga aumenta na proporção do quadrado da velocidade de rotação. Tal facto significa que um pequeno desequilíbrio num cone a baixa rotação pode não ter importância, mas ser bastante significativo quando a rotação aumenta para valores mais elevados, a partir das 10.000 – 15.000 rpm.

2.7.2 Efeitos do desequilíbrio

Os efeitos do desequilíbrio traduzem-se sobretudo de duas formas¹:

- ? **Sobre a peça;**
- ? **Sobre a máquina.**

Os **efeitos sobre a peça**, manifestam-se através do aparecimento de ondulação na superfície maquinada, resultante das vibrações. As frequências elevadas destas vibrações causam um acabamento superficial pobre. O não cumprimento das tolerâncias de fabrico e a consequente rejeição de peças é outra das consequências.

No que respeita à **máquina-ferramenta**, as consequências podem ser bastante graves. As forças centrífugas causam tensões internas elevadas na árvore da máquina que podem resultar na falha prematura dos rolamentos. Os custos de reparação deste tipo de avarias, são muito elevados, havendo também a considerar as perdas de produção associadas.

Os fabricantes de máquinas-ferramenta optam normalmente pela utilização de guias lineares, por estas permitirem menor atrito e tempos de resposta mais curtos. No entanto, como a sua área de contacto com o barramento é pequena, a estrutura da máquina não absorve completamente as vibrações. Elas são por isso absorvidas pela peça e pela ferramenta que acaba por degradar rapidamente. Estudos realizados pelos fabricantes de ferramentas (Sandvik®) apontam para um aumento da vida útil da ferramenta em cerca de 50%, quando se utilizam cones equilibrados.

Na figura 2.36 pode observar-se o efeito do desequilíbrio da ferramenta no acabamento superficial de uma peça em alumínio.

¹ De acordo com a publicação de Michael Layne, Product Manager – Universal Applications, American Hofmann Corp. “*Detecting and correcting unbalance in toolholders for High speed Machining*”

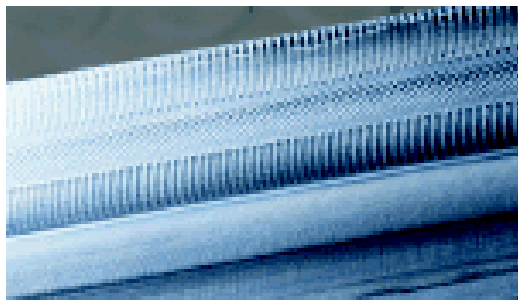


Figura 2.36 Efeito do desequilíbrio da ferramenta no acabamento superficial de uma peça em alumínio
(*American Hofman¹*)

A figura 2.36 evidencia claramente o efeito das vibrações da ferramenta sobre a peça.

2.7.3 Fontes do desequilíbrio dos porta-ferramentas²

O desequilíbrio dos porta-ferramentas pode ser originado por dois tipos de variáveis:

- ? **Controláveis;**
- ? **Incontroláveis.**

As **variáveis controláveis** dizem respeito à geometria dos cones e podem ser eliminadas pelo fabricante durante a concepção e fabrico dos mesmos.

As **variáveis incontroláveis** relacionam-se com o método de fixação da ferramenta e com o tipo de ferramenta. A porca de aperto dos cones porta pinças ao mudar de posição após cada troca de ferramenta, afecta o seu equilíbrio. A ferramenta deverá também ser simétrica ou seja, as ferramentas para aplicação em cones Weldon, não são apropriadas para alta velocidade. A ranhura para fixação destas ferramentas causa uma assimetria e o consequente desequilíbrio.

Os porta-ferramentas a utilizar em alta velocidade, deverão ser sempre equilibrados pelo fabricante e contemplar a gama de rotações da máquina a que se destinam.

¹ <http://www.mmsonline.com>

² De acordo com a publicação de Michael Layne, Product Manager – Universal Applications, American Hofmann Corp. “*Detecting and correcting unbalance in toolholders for High speed Machining*”

2.7.4 Influência do comprimento da ferramenta nas condições de equilíbrio

Diferentes comprimentos de ferramenta afectam também as condições de equilíbrio. A existência de desequilíbrios é agravada quando se utilizam ferramentas de maior comprimento.

Consideremos uma ferramenta inteiriça de metal duro, como uma viga encastrada, conforme representado na figura 2.37.

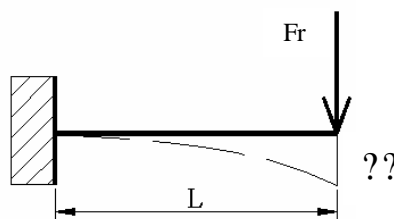


Figura 2.37 Esquema simplificado para representação de uma ferramenta em trabalho

A flexão na extremidade da ferramenta (δ mm) é dada pela expressão:

$$\delta = \frac{Fr L^3}{3EI} \quad (2.8)$$

sendo, Fr a força radial aplicada [N]; L , o comprimento livre [mm]; E , o módulo de elasticidade [MPa]; I , o momento de inércia [mm⁴] ($I = \pi D^4/64$, para uma secção circular, sendo D o diâmetro [mm]).

Se considerarmos a ferramenta sujeita à mesma força radial em duas situações onde apenas varia o seu comprimento livre, L e com base na expressão 2.8, pode escrever-se que:

$$\frac{\delta_2}{\delta_1} = \left(\frac{L_2}{L_1} \right)^3 \quad (2.9)$$

Nesta expressão, L é o comprimento da ferramenta e δ a respectiva flexão. O gráfico da figura 2.38 traduz esta relação.

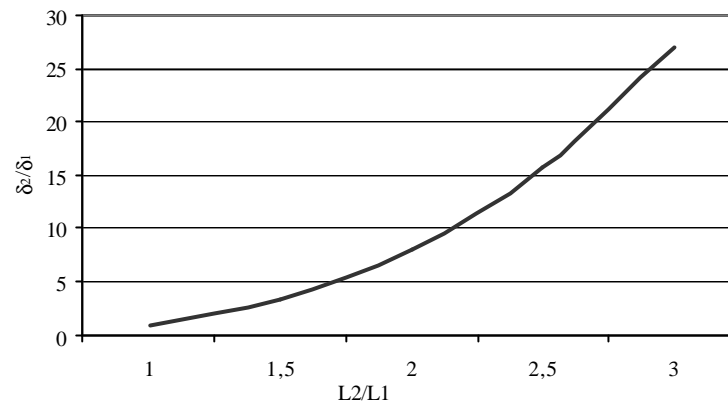


Figura 2.38 Valores de δ_2/δ_1 para diferentes valores de L_2/L_1

Pela análise do gráfico da figura 2.38 verifica-se que um aumento do comprimento da ferramenta de 20%, aumenta a flexão da ferramenta para o dobro.

Considerando por outro lado o mesmo comprimento livre da ferramenta para a mesma força de corte e variando o seu diâmetro, D , obtém-se:

$$\frac{\delta_2}{\delta_1} = \frac{1}{\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4} \quad (2.10)$$

Sendo D o diâmetro da ferramenta [mm] e δ a respectiva flexão [mm].

A figura 2.39 traduz graficamente esta relação

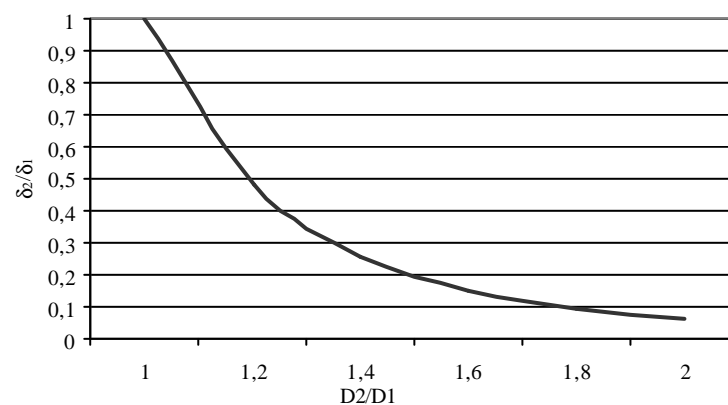


Figura 2.39 Valores de δ_2/δ_1 para diferentes valores de D_2/D_1

Pela leitura do gráfico da figura 2.39 verifica-se que um aumento do diâmetro de apenas 20% reduz a flexão da ferramenta para metade.

Esta análise deixa clara a necessidade de fixar as ferramentas com o menor comprimento possível, em função da geometria a maquinar. A utilização de ferramentas de maior diâmetro, desde que a sua utilização seja viável, é também um factor decisivo na redução da flexão da ferramenta e consequente melhoria da estabilidade no processo de corte. As ferramentas de pequeno diâmetro (menor que 6 mm) possuem normalmente uma zona de aperto com 6 mm de diâmetro, diminuindo este valor de forma gradual até ao diâmetro de trabalho, como mostra a figura 2.40.



Figura 2.40 Geometria das ferramentas de pequeno diâmetro (Cerin®)

Com o tipo de construção representado na figura 2.40 as ferramentas possuem maior rigidez, ficando menos sujeitas a flexão.

A utilização de turbinas de alta rotação deve também ser objecto de análise para evitar o agravamento das situações de desequilíbrio. Na figura 2.41, é possível comparar a montagem de uma ferramenta num cone porta pinças normal e recorrendo a uma turbina de alta rotação.

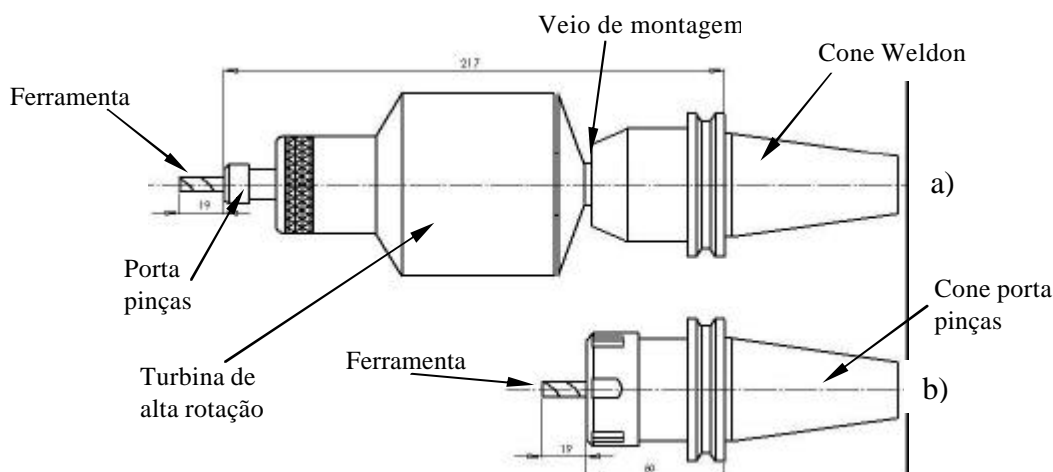


Figura 2.41 Montagem da ferramenta na turbina de alta rotação (a) e montagem standard (b)

Como se pode observar na figura 2.41, embora o comprimento livre da ferramenta seja o mesmo nas duas situações, a ferramenta encontra-se mais afastada da árvore da máquina quando montada na turbina de alta rotação. Qualquer folga ou erro de montagem da

ferramenta ou da própria turbina irá ampliar o efeito de possíveis vibrações que ocorram durante o corte.

2.8 Controladores e Integração CAD/CAM

As máquinas de alta velocidade possuem de três a cinco eixos controlados em simultâneo. A dificuldade de implementação destas máquinas numa fase inicial, deveu-se fundamentalmente às limitações dos controladores, que não possuíam a velocidade de processamento necessária (*Kief, 1998*).

É importante que os controladores possuam **tempos de processamento** de bloco curtos, na ordem de 1 ms.

Outra função importante, é a função de previsão (*look ahead*) que consiste na leitura antecipada da geometria a maquinar, a tempo de proceder ao ajustamento da velocidade de avanço, evitando assim erros de trajectória. O **tempo curto de resposta dos motores** dos eixos é outro dos aspectos que permite acelerações e desacelerações elevadas (superiores a 1G) e em consequência, grande precisão de movimentos. Desta forma é possível trabalhar com avanços elevados e garantir o rigor geométrico do contorno a maquinar.

Actualmente, coloca-se um novo desafio aos controladores. A codificação das trajectórias geradas pelos sistemas CAM é feita com a utilização de pós processadores, sendo depois enviadas para a máquina. Esta interligação com o CNC pode gerar algumas imprecisões na transmissão de dados referentes a geometrias complexas. A maioria dos pós-processadores transforma as trajectórias curvilíneas em trajectórias rectilíneas. As superfícies maquinadas apresentam por isso um aspecto facetado devido a essa linearização.

Para melhor compreensão deste fenómeno, observe-se a figura 2.42 onde são apresentadas três situações que definem diferentes métodos de interpolação de uma trajectória.

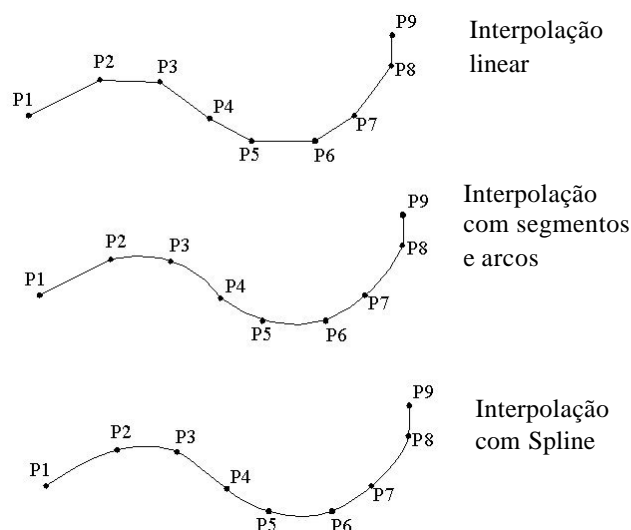


Figura 2.42 Diferentes métodos de interpolação de uma trajectória

No primeiro caso, (**interpolação linear**) a trajectória é definida por vários segmentos e o número de linhas de programa é maior. Embora se trate de trajectórias simples, este método pode dar origem a irregularidades no percurso da ferramenta quando as velocidades de avanço são elevadas.

No caso da interpolação através de **segmentos e arcos**, o número de pontos de controlo é menor e os programas são mais curtos.

No caso do contorno ser definido por uma “Spline”, a trajectória da ferramenta não é controlada por rectas e arcos, mas sim por um modelo matemático que engloba os pontos da trajectória. Ou seja, uma “Spline” é tratada como uma única entidade, dando origem a programas ainda mais curtos.

Ao programar uma trajectória definida por NURBS (*Non-Uniform Rational B-Spline*) ou curvas de Bézier, os pós-processadores, de uma forma geral, procedem à linearização da trajectória, partindo-a em pequenos segmentos. Esta opção dá origem a programas extensos.

Alguns controladores como o “Acramatic A2100®” dispõem de um código “G” (G6.2) para programar curvas definidas por NURBs. Mas a utilização dos pós-processadores acaba por inibir esta potencialidade. Ou seja, os pós-processadores não são totalmente compatíveis com o controlador.

Ultrapassar estas incompatibilidades constitui um desafio aos controladores actuais: **processar directamente os dados geométricos** provenientes dos sistemas CAD.

Desta alteração resultarão muitas vantagens, salientando-se as seguintes (*Schulz, 1997*):

- ? Programas NC mais reduzidos em relação aos que resultam da interpolação linear;
- ? Substituição de pequenos segmentos de recta por curvas, eliminando problemas como o tempo de processamento de bloco e as acelerações/desacelerações. Como consequência imediata, obtém-se um melhor acabamento das superfícies maquinadas.
- ? Redução do tempo de maquinagem, uma vez que a velocidade de avanço real se aproxima do avanço programado.

2.8.1 Parâmetros Operatórios do Controlador¹

Os controladores das máquinas CNC são caracterizados por três parâmetros fundamentais:

- ? **O tempo de transferência de bloco;**
- ? **O tempo de interpolação;**
- ? **O tempo de processamento de bloco.**

Estes parâmetros assumem maior importância na programação de segmentos lineares. Cada um deles afecta de forma distinta o CNC.

- **O tempo de transferência de bloco**, é o tempo que o CNC demora a receber um bloco de informação do programa. Se o tempo de transferência de bloco for de 3 ms (milissegundos) o CNC, é capaz de receber 333 blocos por segundo (bps). A capacidade de receber a informação rapidamente, é importante para fazer correr o programa de forma suave.
- **O tempo de interpolação** é o tempo que o CNC trabalha para criar segmentos de interpolação. Os arcos e os círculos são introduzidos como comandos de linhas simples. O CNC vai gerar pequenos movimentos lineares. O tempo de

¹ <http://www.mms.online.com> – *Rapid Milling for prototypes*, - by Todd Shuett – Creative Technology Corporation

interpolação é o factor limitante, dado que é ele que vai determinar o tamanho dos incrementos para uma dada velocidade de avanço.

- **O tempo de processamento de bloco - TPB** , é o tempo que o controlador necessita para comandar os eixos e verificar a sua posição.

O TPB deve ser o mais curto possível. Quando a máquina executa um movimento, se o tempo de processamento de bloco for demasiado longo, pode acontecer que a posição final seja atingida antes que a ordem para o movimento seguinte seja executada. As máquinas mais recentes ultrapassam este problema, reduzindo a velocidade de avanço. O avanço máximo a programar, a [mm/min] para determinada máquina, depende do tamanho do segmento a programar Δx [mm], do TPB [ms] e é dado pela expressão 2.11.

$$a \leq \frac{\Delta x}{TPB / 60} \quad (2.11)$$

Com base na expressão 2.11 são apresentados na figura 2.43 os valores dos segmentos mínimos em função do avanço pretendido (a), para três valores de tempo de processamento de bloco.

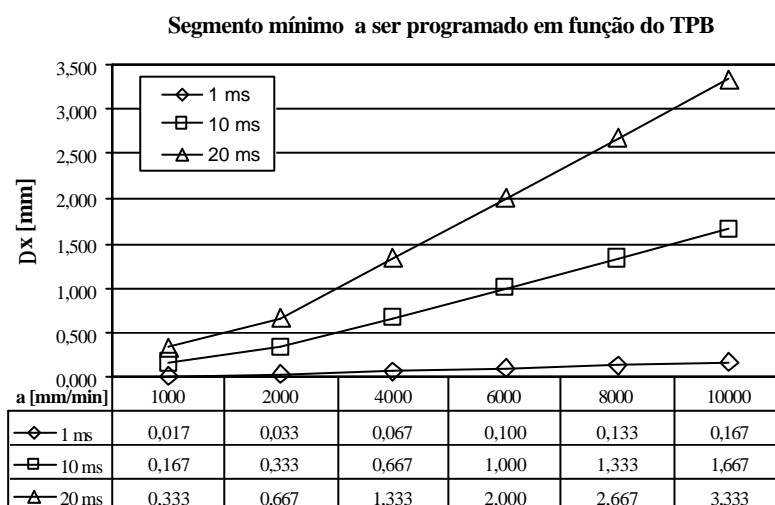


Figura 2.43 Segmento mínimo a ser programado em função do TPB (Helleno et al, 2003)

Como se pode observar na figura 2.43, para uma máquina com um TPB de 20 ms, a utilização de um avanço de 2000 mm/min só será efectiva se o programa contiver segmentos maiores que 0,667 mm.

A maquinagem a alta velocidade implica uma conjugação dinâmica entre o “look-ahead” e o TPB da máquina. A concepção das máquinas actuais assenta num CNC evolutivo, capaz

de ajustar a velocidade de avanço sem a intervenção do operador. Desta forma, a máquina otimiza os movimentos da ferramenta, garantindo a qualidade das superfícies maquinadas à custa do aumento do tempo total de maquinagem.

2.9 Estratégias de maquinagem

Nos últimos anos tem-se verificado uma tendência generalizada para a suavização de formas e contornos na maioria dos objectos que preenchem o quotidiano. As razões para essa tendência podem ter várias origens. Em alguns dos casos predominam aspectos relacionados com o “design”; noutros são razões de ordem mecânica relacionadas com o fabrico das peças ou com o seu funcionamento; noutros casos são ainda razões de ordem funcional ou de segurança que determinam as diversas geometrias.

Por todas estas razões, a maquinagem de moldes e matrizes reveste-se de desafios cada vez mais exigentes. Num contorno, a simples transformação de uma aresta numa concordância, conduz ao incremento no número total de linhas de programa. A complexidade das formas constitui um desafio constante para as empresas fabricantes de “software”. A tendência geral é a de associar geometrias com determinados tipos de estratégias de maquinagem, de forma a otimizar o percurso da ferramenta e reduzir o tempo de produção.

As geometrias podem englobar-se em duas categorias fundamentais:

? **Geometrias 2D;**

? **Geometrias 3D.**

As geometrias 2D são as que assentam num plano cartesiano (normalmente o plano XY), podendo variar a sua profundidade (segundo o eixo Z). Para estas geometrias, os controladores possuem normalmente os ciclos pré programados. Através de uma linguagem “*conversacional*”, baseada em simbologia elucidativa de cada operação, basta preencher os campos relativos a cada variável e obtém-se a sequência de instruções para executar a operação pretendida. A grande vantagem destes ciclos pré-programados, é a obtenção de programas curtos, fáceis de executar e interpretados directamente pelo controlador. Na figura 2.44 encontra-se esquematizada a elaboração deste tipo de programas.

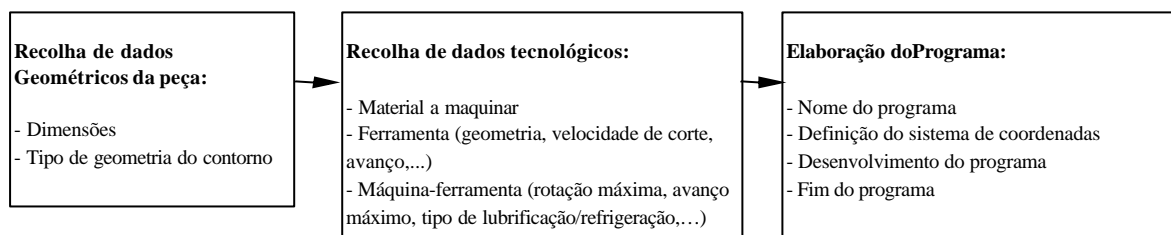


Figura 2.44 Princípio básico para criação manual de um programa CNC

A título de exemplo, pode observar-se na figura 2.45 e seguintes, o ambiente do controlador Síemens - Acramatic 2100¹.

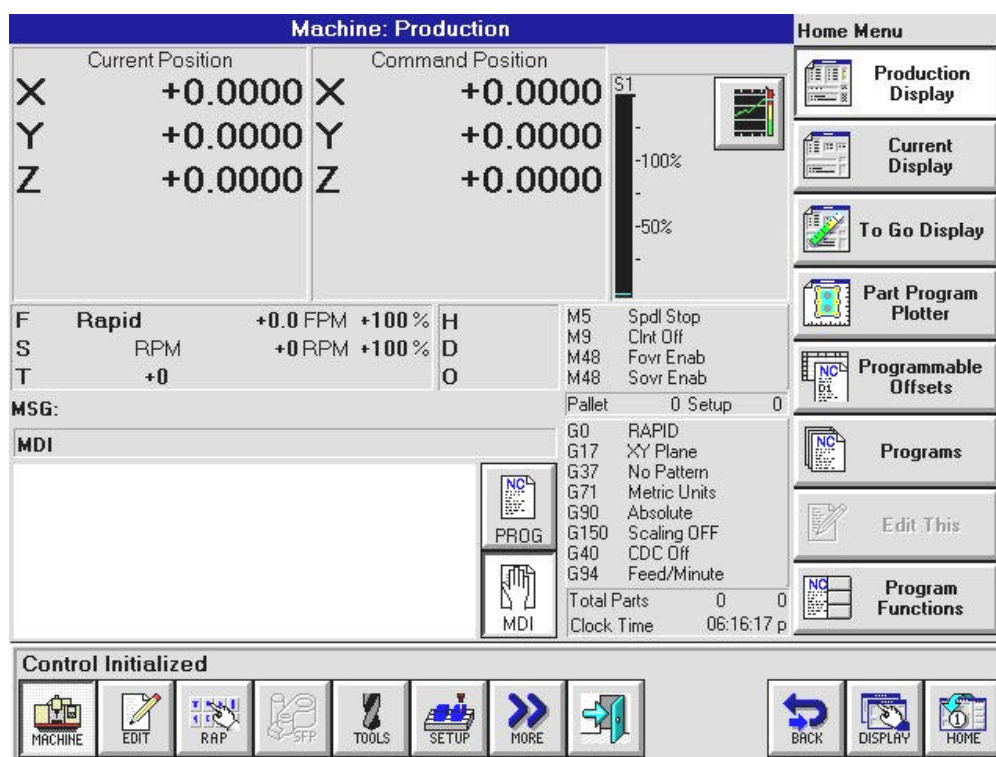


Figura 2.45 Ambiente de trabalho do controlador Síemens - Acramatic 2100

Na figura 2.46 é apresentado o ambiente de programação com as diferentes opções

¹ Com autorização do representante: Manuel Pousada, Herds

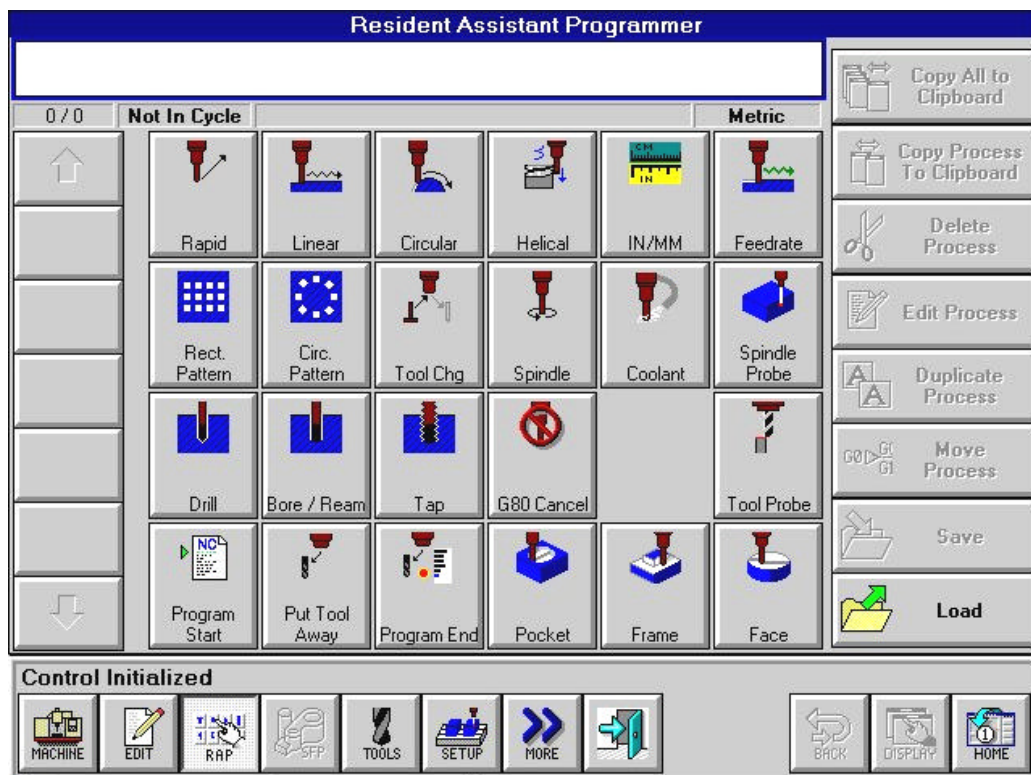


Figura 2.46 Ambiente de programação do controlador *Siemens - Acramatic 2100®*, baseado em ciclos pré-programados (*Resident Assistant Programmer*)

Após a selecção das várias operações, estas podem ser copiadas para o ambiente de trabalho, onde é apresentada a sequência em linguagem ISO. Esta sequência de procedimentos é apresentada nas figuras 2.47 e 2.48.

Trata-se de um pequeno programa para execução de 5 furos (K5) igualmente distribuídos numa circunferência com 100 mm de diâmetro (D100). O centro da circunferência é o ponto X0Y0 e o primeiro furo encontra-se na posição correspondente a um ângulo de zero graus (P0).

Sem recurso a este modo de programação o programa seria mais extenso e obrigaria ao conhecimento das coordenadas do centro de cada furo.

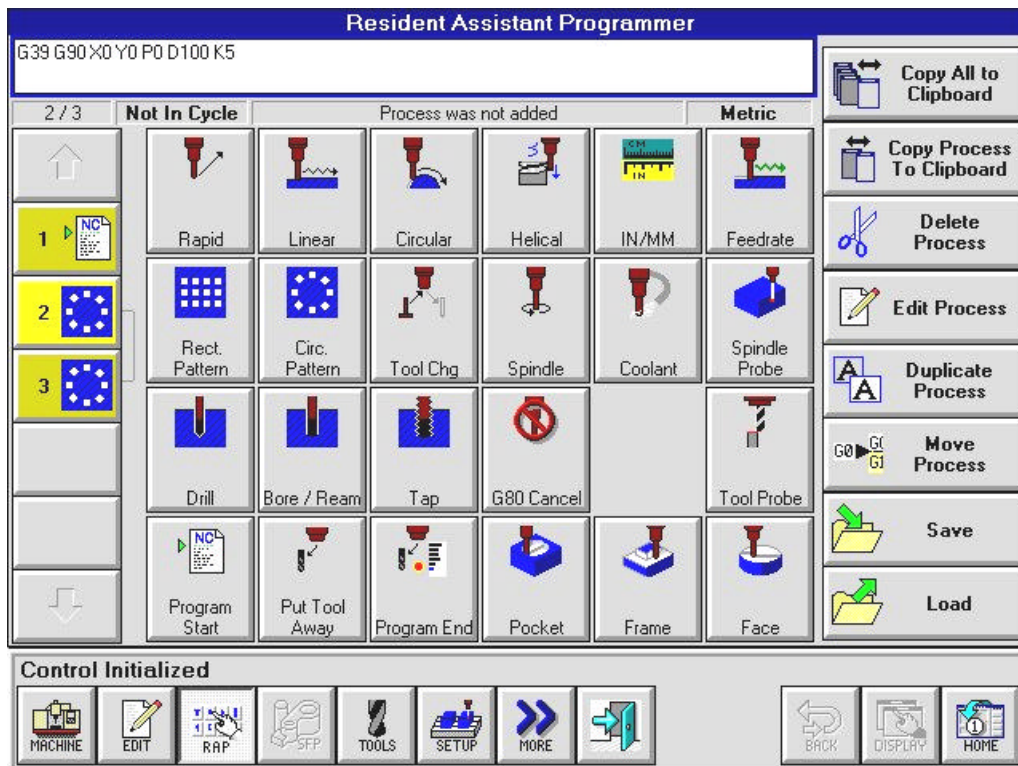


Figura 2.47 Programação em modo RAP (*Resident Assistant Programmer*)

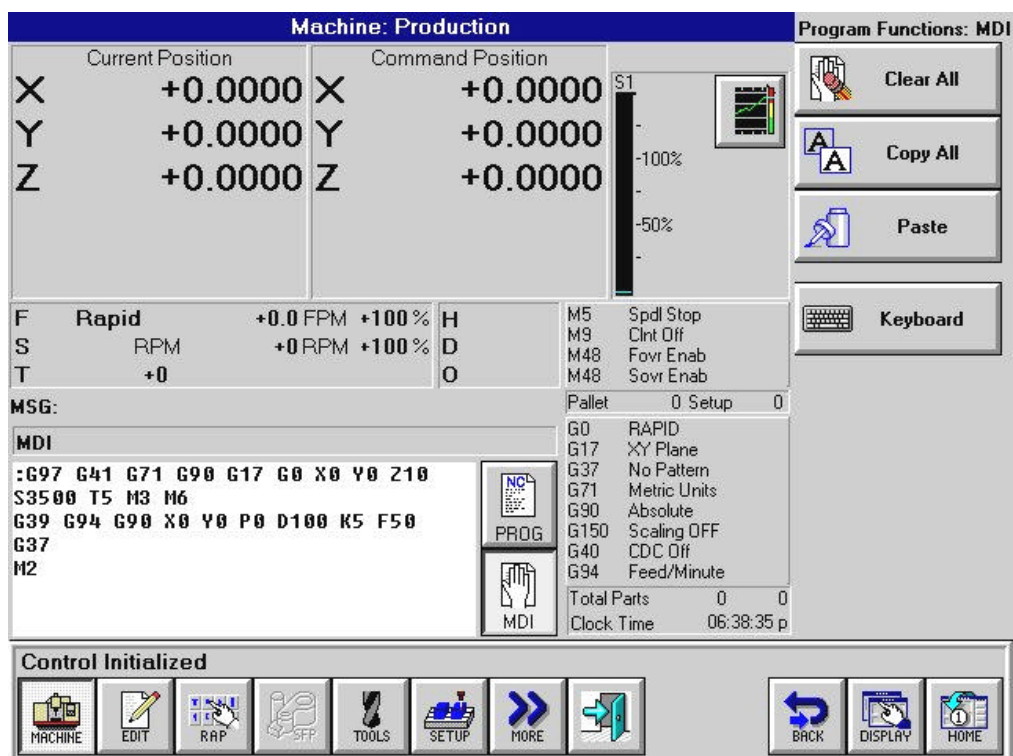


Figura 2.48 Programa copiado para o ambiente de trabalho em modo MDI (*Manual Data Input*)

As **geometrias 3D** são de tratamento mais complexo. A transição entre vários pontos implica uma mudança contínua de coordenadas segundo os três eixos, X,Y,Z. A título de exemplo, é apresentada na figura 2.49 ilustra uma geometria 3D.

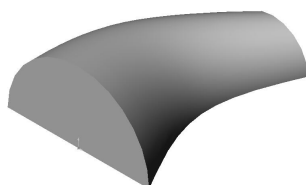


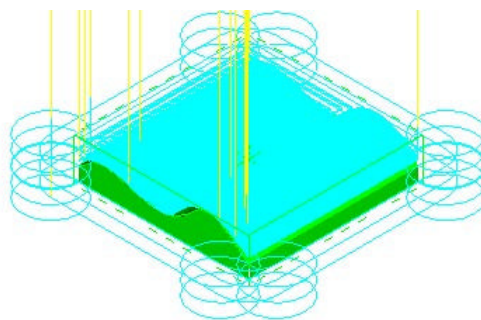
Figura 2.49 Geometria 3D

As coordenadas de cada ponto são únicas. A programação das operações de fabrico destas geometrias geralmente só é possível com recurso a programas CAM (*Computer Aided Manufacturing*).

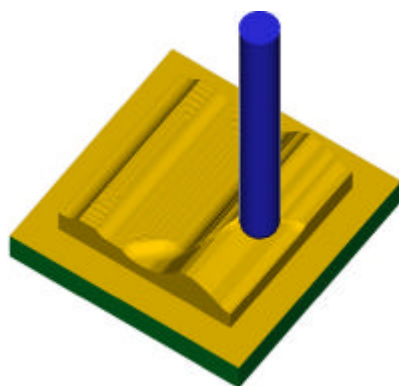
Estes programas identificam as geometrias e permitem a geração de trajectórias a partir do modelo geométrico da peça a fabricar. A título de exemplo, é apresentada na figura 2.50 a sequência utilizada na criação de um programa de um modelo 3D, com recurso a “software” *Cad/Cam*.



a) Modelo 3D



b) Selecção de estratégias



c) Simulação da maquinagem

```

MILLWCPART1.PRT.NC
:CGO G71 G40 G94
(MSG, PROGRAM NAME = GEON 3D.PRT)
(MSG, DATE=DD-MM-VV - 15-11-83 TIME=HH:MM - 00:21)

(MSG, TOOL - 2 DIA. - 10.)
T2 M6
N10 G0 G90 X-15. Y-20. S2864 M3
N12 Z50.
N14 Z12.191
N16 G1 Z4.794 F286.4
N18 G02 X15. F572.8
N20 G3 X20. Y-15. P5.
N22 G1 V15.
N24 G3 X15. V20. P5.
  
```

d) Programa CNC pós processado

Figura 2.50 Metodologia para criação do programa de um modelo 3D

Os programas CAM actualmente utilizados evoluíram no sentido de tratar geometrias complexas. Os vários “softwares” como por exemplo o *PowerMill*®, *Unigraphics*®, *Cimatron*®, *Catia*®, *MasterCam*®, *Pró-Engineer*®, *Depo-Cam*® entre outros, desenvolveram estratégias de maquinagem que apesar de algumas diferenças na designação, acabam por se assemelhar no que respeita ao seu funcionamento. Pode acontecer que uma ou outra estratégia de um dado programa seja mais favorável a determinada aplicação.

As estratégias de maquinagem de cada “software”, caracterizam a forma como cada um gera as trajectórias em função da geometria a maquinar.

O que se pretende com qualquer estratégia é não só retirar o máximo material no menor tempo possível (taxa de remoção de material elevada), mas também obter o acabamento superficial exigido.

As estratégias estão intimamente relacionadas com os parâmetros de maquinagem. Torna-se por isso pertinente referir os factores que contribuem para tornar efectiva a maquinagem a alta velocidade. Esses factores são os seguintes:

- ? **Os parâmetros de corte;**
- ? **A entrada e saída da ferramenta no material a maquinar;**
- ? **As estratégias de maquinagem (usadas no desbaste, semi-acabamento e acabamento)**

Uma regra fundamental na maquinagem a alta velocidade consiste em procurar manter constantes as forças de corte. Para se conseguir esse objectivo, é necessário que a espessura de material e a taxa de remoção sejam constantes. Daí a importância dos *parâmetros de corte*.

Especialmente nas operações de acabamento, é importante que o avanço por dente (*az*) seja idêntico à profundidade de corte radial (*pr*). Conseguem-se assim superfícies com a mesma rugosidade superficial em duas direcções e portanto mais uniformes, como se encontra esquematizado na figura 2.51.

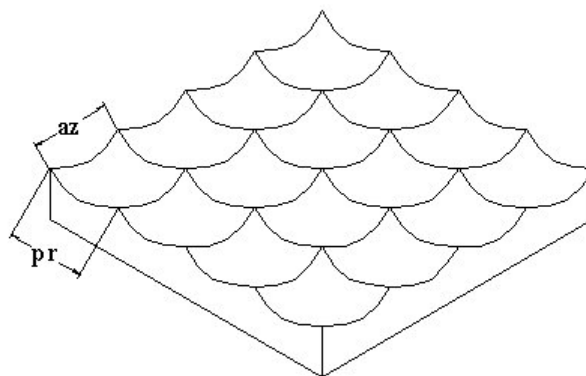


Figura 2.51 Aspecto do acabamento superficial para $az = pr$

A profundidade de corte (p), é outro parâmetro fundamental que influencia o tempo de maquinagem e as condições de corte. Quanto maior a profundidade de passagem, maior será a flexão da ferramenta e a possibilidade de ocorrência de vibrações.

A dureza do material a maquinar e a relação comprimento/diâmetro da ferramenta, são dois factores que condicionam a escolha da profundidade de passagem. Como regra, recomenda-se a relação $p/pr \geq 0,2$ ¹ nas operações de acabamento.

A entrada e saída da ferramenta no material deve ser o mais suave possível. Desta forma, evitam-se choques e vibrações que apenas contribuem para o desgaste acelerado da ferramenta e para a obtenção de superfícies de má qualidade.

A entrada da ferramenta no material deve ser realizada em rampa quando se trata de operações de facejamento ou de abertura de caixas, ou tangente à superfície a maquinar no caso de operações de contorno exterior. As figuras 2.52 e 2.53 ilustram as duas situações.

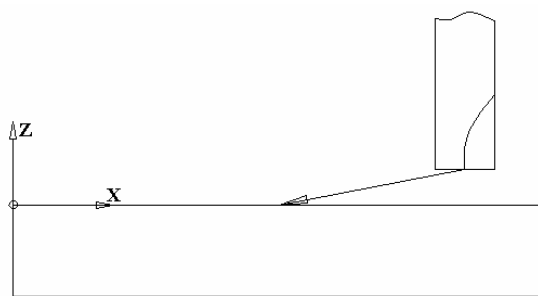


Figura 2.52 Entrada em rampa numa operação de facejamento

¹ Sandvik Coromant – Guia de aplicação – Fabricação de moldes e matrizes

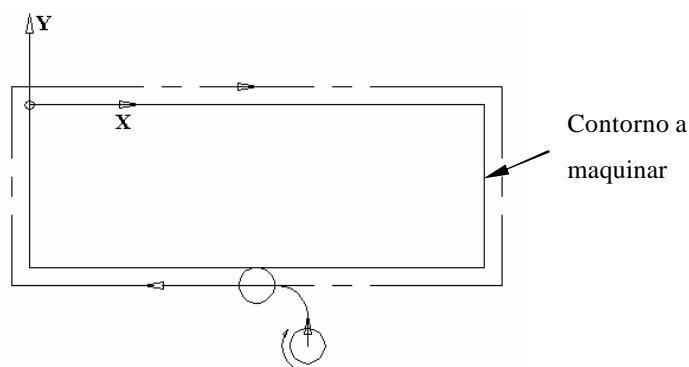


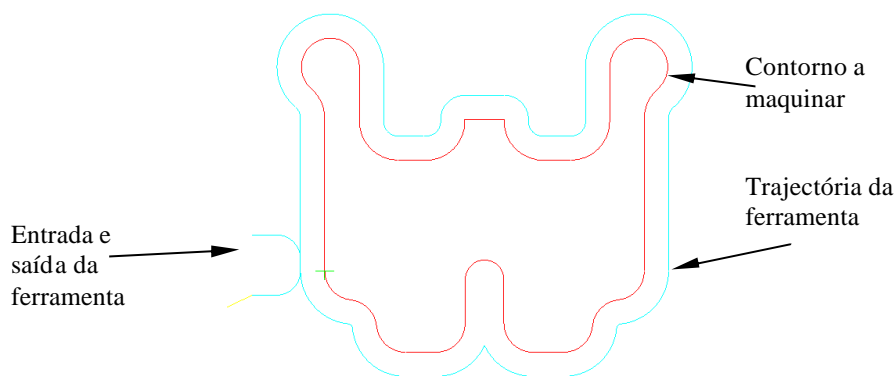
Figura 2.53 Entrada tangente à trajectória numa operação de contorno

A programação deste tipo de entradas permite também definir outras opções para minimizar tempos mortos. No caso da entrada tangente na operação de contorno, se a operação exigir várias passagens, a trajectória de entrada só deve realizar-se na primeira passagem. A descida da ferramenta pode ser definida de forma contínua, segundo um percurso helicoidal à volta do contorno. Ao atingir o limite inferior, é realizada uma passagem final de acabamento à cota mínima do contorno.

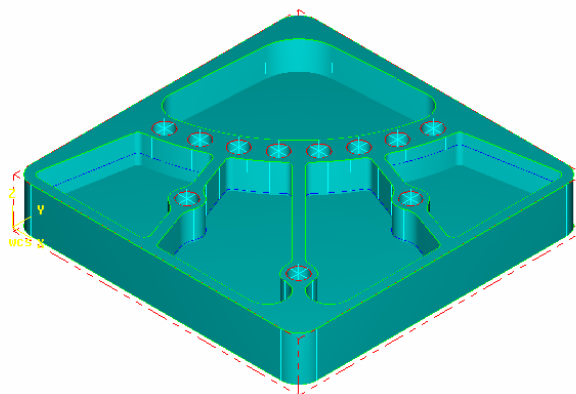
A saída da ferramenta pode ser, ou não, tangente à trajectória, em função da geometria do contorno. Este tipo de entradas permite um contacto gradual da ferramenta com o material, evitando choques que prejudiquem a ferramenta. Em qualquer das situações, a ferramenta deverá manter-se à esquerda do material para que o corte se faça sempre que possível em *concordância*. Esta situação de corte é particularmente importante para as ferramentas de metal duro, uma vez que os esforços resultantes são essencialmente esforços de compressão.

Relativamente às **estratégias de maquinagem** e como já foi referido, cada geometria se enquadra melhor numa dada estratégia. Pretende-se que a operação de desbaste seja uma boa aproximação à forma final da peça. Assim, as estratégias nesta fase e na fase de acabamento são por vezes muito semelhantes.

As trajectórias de **contorno exterior** são realizadas num plano de trabalho segundo dois dos eixos, (XY, por exemplo), sendo incrementada a terceira coordenada (Z) após cada passagem. A figura 2.54 mostra um exemplo, podendo observar-se também a entrada e saída da ferramenta tangente à trajectória.

**Figura 2.54** Contorno 2D¹

Na figura 2.55 pode observar-se um modelo em que predomina a maquinagem de caixas (*Pocket*), tendo por base trajetórias de contorno.

**Figura 2.55** Maquinagem de caixas¹ (*Pocket*)

As características da alta velocidade são introduzidas na fase de programação das trajetórias. A maquinagem não deve ser realizada por patamares segundo o eixo Z, mas sim uma cavidade de cada vez. Evita-se desta forma a subida e descida da ferramenta para mudar de cavidade em cada incremento segundo Z.

Na figura 2.56 é visível o percurso da ferramenta em cada uma das cavidades da peça representada na figura 2.55. Pode também observar-se a trajetória nos cantos, onde a ferramenta descreve um percurso circular, evitando a desaceleração.

¹ Reprodução do *MasterCam*® com autorização da *GrandeSoft*

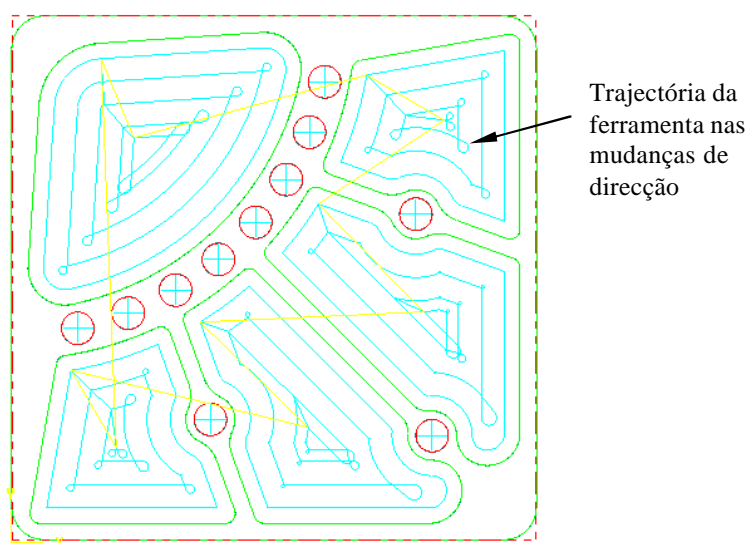


Figura 2.56 Percurso da ferramenta na maquinagem de cavidades¹ (*Pocket*)

Esta solução é adoptada por outros programas como por exemplo o *Cimatron*[®], conforme pode ser observado na figura 2.57.

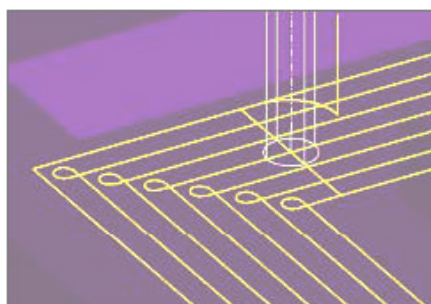


Figura 2.57 Arredondamento de cantos²

Na figura 2.58, pode observar-se a selecção do método de movimentação da ferramenta para realização de uma operação de desbaste com o *MasterCam*.

¹ Reprodução do *MasterCam*[®] com autorização da *GrandeSoft*

² www.cimatron.com

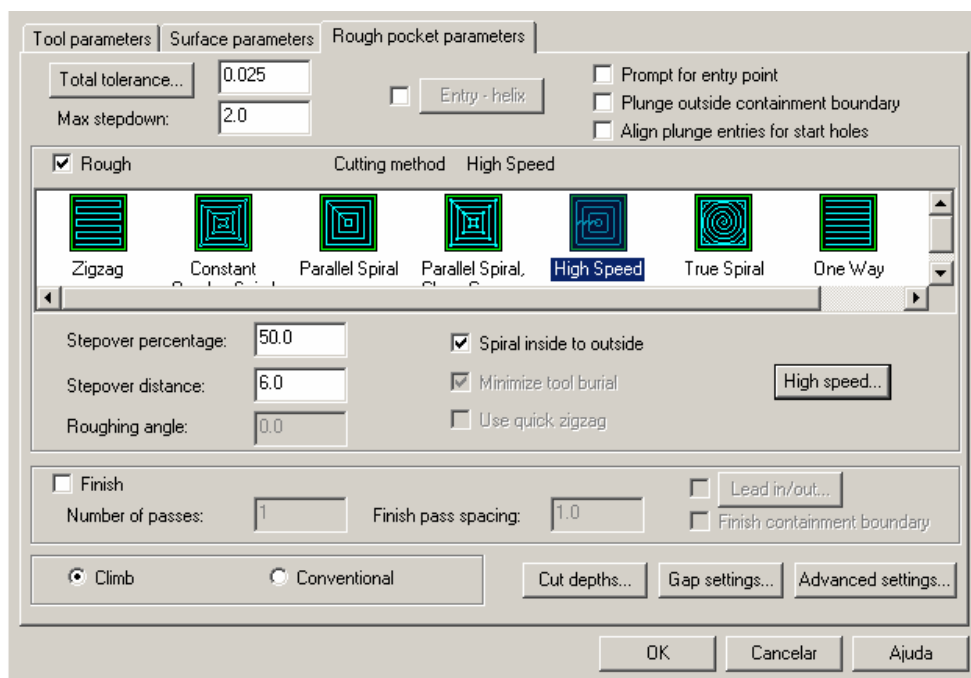


Figura 2.58 Selecção método de desbaste¹

Depois de seleccionar o método de desbaste, os parâmetros podem ser afinados como indicado na figura 2.59.

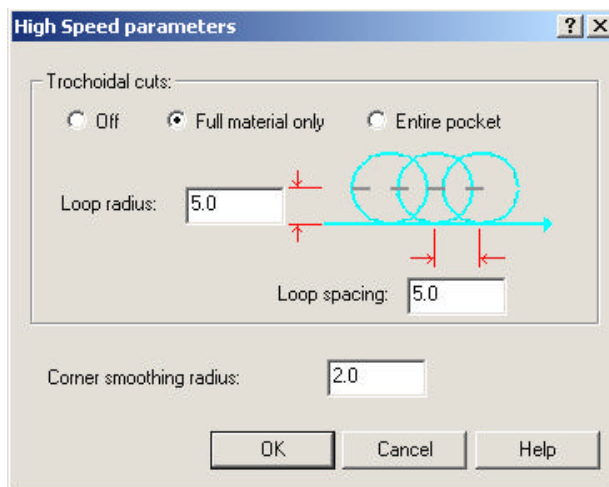


Figura 2.59 Selecção do movimento da ferramenta em alta velocidade¹

Esta opção permite seleccionar o movimento “trochoidal” da ferramenta e definir os parâmetros desse movimento. O movimento trochoidal é caracterizado pela descrição de movimentos circulares pela ferramenta, enquanto realiza o movimento de rotação ou de

¹ Reprodução do *MasterCam* com autorização da *GrandeSoft*

corte. Nas operações de acabamento também é possível definir a opção de alta velocidade na transição entre trajetórias, como ilustra a figura 2.60.

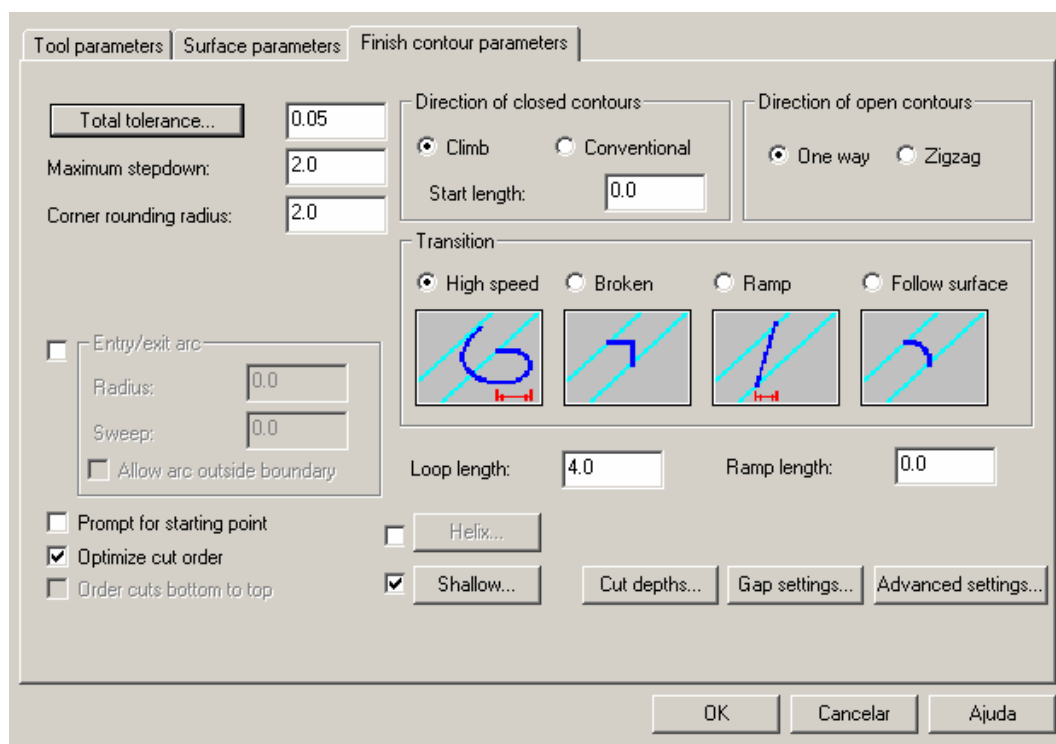


Figura 2.60 Seleção da opção de alta velocidade numa operação de acabamento¹

Há também outro tipo de estratégias que se revelam muito eficazes na maquinagem a alta velocidade e que passam a descrever-se:

Fresagem a Z constante

Com esta estratégia, a ferramenta trabalha a níveis de Z constante, sendo possível controlar a profundidade de corte.

Nas figuras 2.61 e 2.62 apresenta-se um exemplo de aplicação desta estratégia.

¹ Reprodução do MasterCam com autorização da GrandeSoft

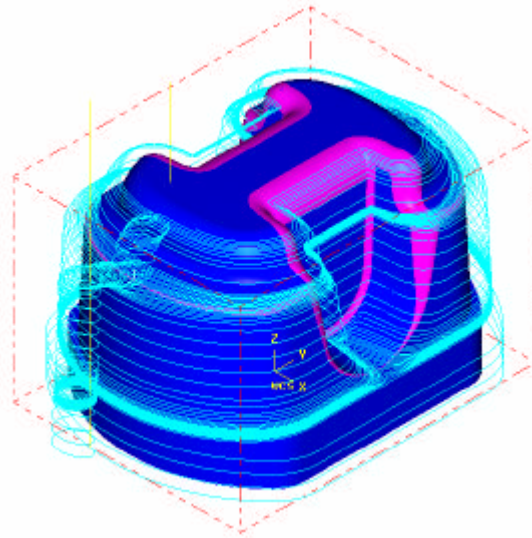


Figura 2.61 Fresagem a Z constante¹

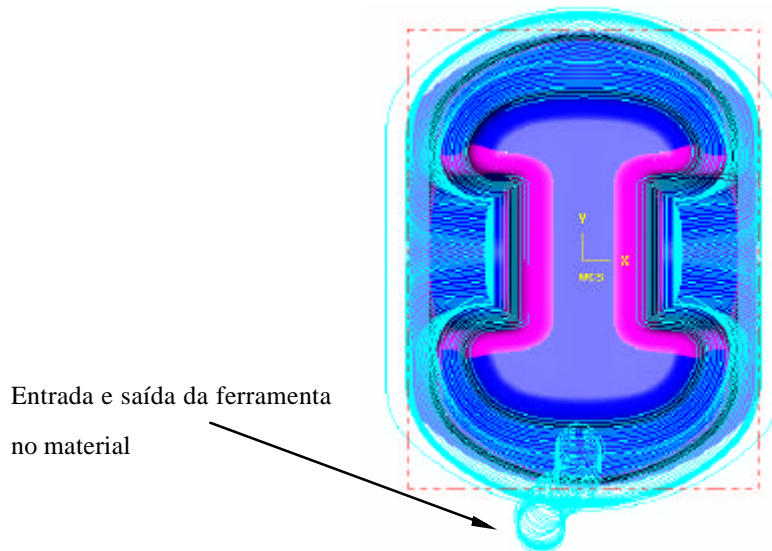


Figura 2.62 Fresagem a Z constante – Vista de topo¹

Como a posição dos pontos de entrada e saída da ferramenta na peça podem ser controlados, pode obter-se uma superfície acabada sem marcas. Ao mesmo tempo, consegue-se uma taxa de remoção de material constante.

¹ Reprodução do MasterCam com autorização da GrandeSoft

Acabamento em 3D Offset

Esta estratégia mantém um incremento constante relativamente à superfície a maquinar.

É uma estratégia muito utilizada em peças com superfícies próximo da vertical. Permite que, independentemente das superfícies serem inclinadas ou planas, o acabamento seja de qualidade. Na figura 2.63 é apresentado um modelo ilustrativo desta estratégia.

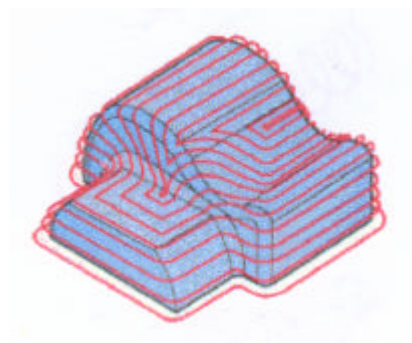


Figura 2.63 Acabamento em 3D Offset¹

Opções semelhantes são usadas por exemplo pelo *MasterCam*® com a designação *Shallow*, como ilustram as figuras 2.64 e 2.65 e pela *Cimatron*® com o *Smart Machining* ilustrado na figura 2.66. Neste último caso, quando é utilizada a estratégia em desbaste, a aproximação à sobre-espessura para acabamento é de tal forma precisa que dispensa a operação de semi-acabamento.

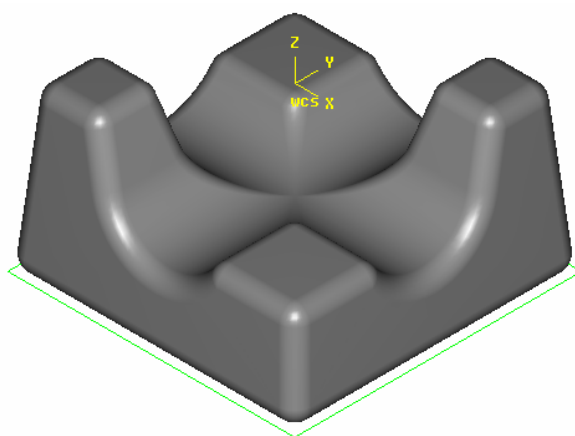


Figura 2.64 Peça a maquinar²

¹ www.delcam.com

² Reprodução do *MasterCam* com autorização da *GrandeSoft*

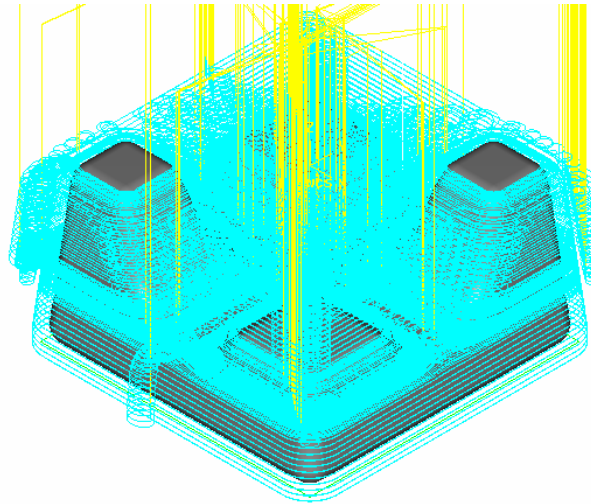


Figura 2.65 Peça a maquinar, com indicação do percurso da ferramenta usando a estratégia *Shallow*¹

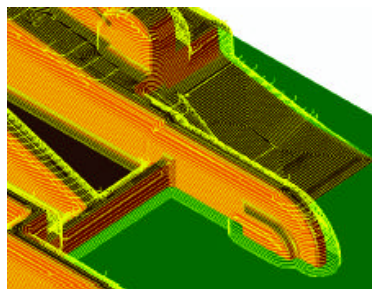


Figura 2.66 Utilização da estratégia Smart Machining²

Podem também encontrar-se variantes desta estratégia como por exemplo *contour*, *scallop* e *flowline* disponíveis no *MasterCam*[®].

Fresagem Radial

Esta estratégia é também comum à generalidade dos programas. É utilizada com mais frequência no acabamento de componentes de geometria circular e permite boa qualidade superficial. A trajectória parte de um ponto central, com incrementos angulares que variam de 0 a 360°, conforme esquematizado na figura 2.67

¹ Reprodução do *MasterCam* com autorização da *GrandeSoft*

² www.cimatron.com

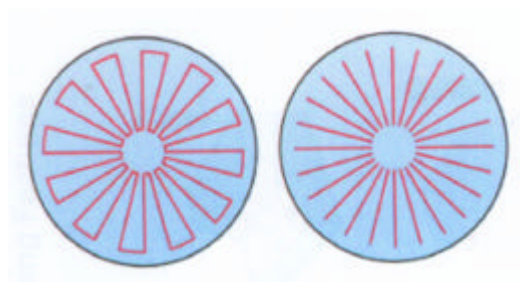


Figura 2.67 Utilização da estratégia radial¹

Fresagem em espiral

Neste tipo de trajetória, a ferramenta move-se do centro para a periferia, como ilustra a figura 2.68 e permite acabamentos de grande qualidade.

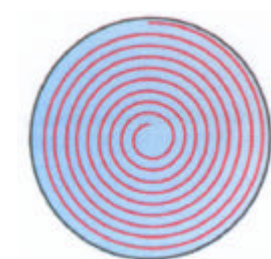


Figura 2.68 Fresagem em espiral¹

Em alguns programas como por exemplo o *MasterCam*®, esta opção não constitui por si só uma estratégia, mas sim uma opção na movimentação da ferramenta dentro da estratégia seleccionada.

Fresagem “parallel”

É uma estratégia de grande interesse na maquinagem de concordâncias e de superfícies complexas. Na figura 2.69 é apresentado um exemplo de fresagem de uma concordância.

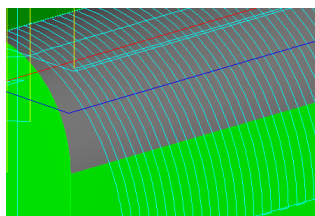


Figura 2.68 Fresagem de uma concordância com a estratégia “parallel” (*MasterCam*®)

¹ www.delcam.com

Fresagem em contorno

Esta estratégia é uma variante da estratégia de contorno usada nas geometrias 2D, aplicada à maquinagem 3D. Pode ser usada em contorno interior, exterior ou combinando as duas situações, ou seja, superfícies côncavas e convexas. A figura 2.69 ilustra uma aplicação desta estratégia.

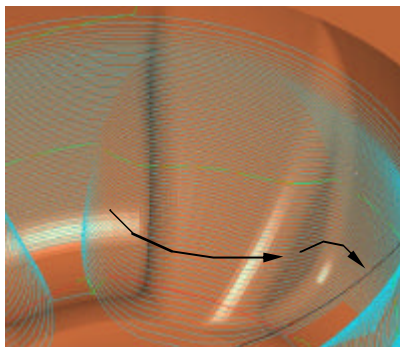


Figura 2.69 Contorno exterior e interior com indicação da direcção de corte da ferramenta (*Depo-Cam*®)

Por questões que se prendem com a optimização dos tempos de maquinagem, opta-se muitas vezes por usar ferramentas de maior diâmetro nas operações de desbaste e de acabamento. Poderá acontecer que a ferramenta usada não atinja determinados pontos devido à sua dimensão.

Haverá por isso zonas da peça onde existe uma sobre-espessura de material exagerada para ser retirada na operação de acabamento. O software deverá por isso dispor da capacidade de analisar os pontos onde se verifica uma sobre-espessura superior a determinado valor e realizar uma operação para retirar esse material, actuando apenas nesses pontos críticos.

É o caso da operação *Remachining* ilustrada na figura 2.70 utilizada pela *Cimatron*®, e do *Restmill* do *MasterCam*®. Estas operações são usadas após o desbaste e destinam-se a uniformizar a sobre-espessura de material para a operação de acabamento.

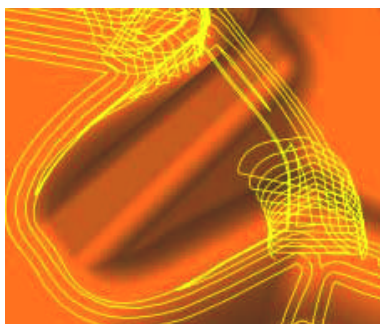


Figura 2.70 Percurso da ferramenta na operação *Remachining* (*Cimatron*®)

Relativamente às operações de acabamento, pode ser usado um procedimento semelhante. Há também a possibilidade de retirar algum material restante recorrendo a operações como o *Leftover* (*MasterCam*®) e *Pencil* (*PowerMill*® e *Depo-Cam*®). Como o próprio nome sugere, esta última operação destina-se a retirar pequeníssimas quantidades de material, utilizando ferramentas de pequeno diâmetro. Na figura 2.71 está ilustrada esta operação.

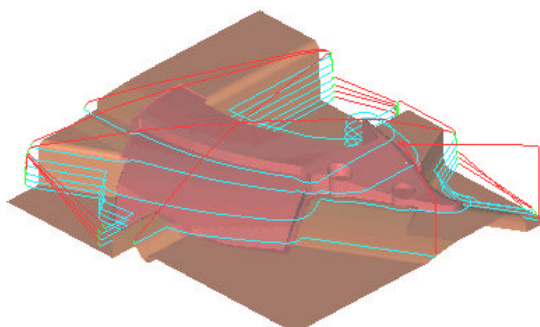


Figura 2.71 Exemplo de uma operação “Pencil Milling” (*Depo-Cam*®)

É oportuno referir que em variadas situações a escolha do percurso da ferramenta é tão importante como a estratégia. A forma como a ferramenta se movimenta é determinante, especialmente no tempo de maquinagem. A figura 2.72 mostra as várias opções de movimentação da ferramenta numa operação de acabamento.

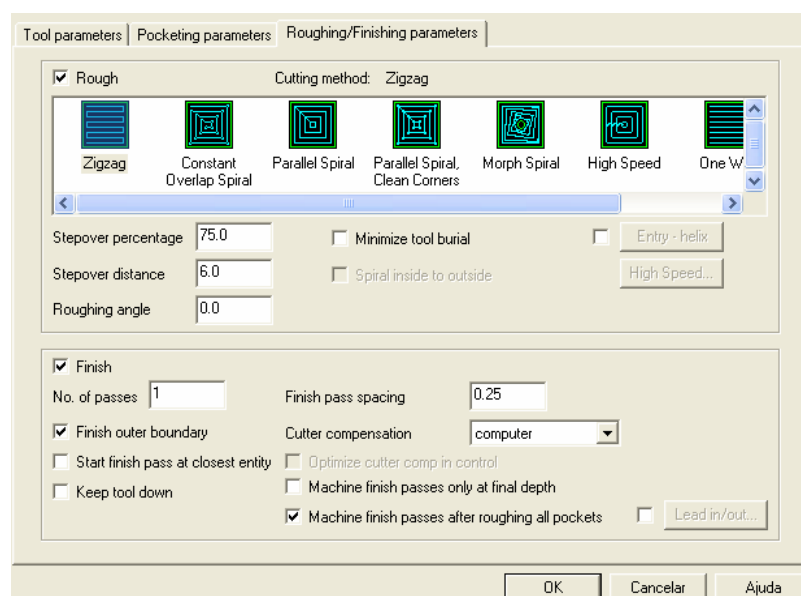


Figura 2.72 Opções para o percurso da ferramenta em acabamento¹

¹ Reprodução do *MasterCam* com autorização da *GrandeSoft*

Pode concluir-se que a escolha de um programa *CAM*, deverá contemplar a disponibilidade de estratégias e opções complementares que permitam racionalizar as operações de maquinagem. O objectivo de qualquer operação deve centrar-se na realização de movimentos suaves, evitando mudanças bruscas de direcção. Devem privilegiar-se as estratégias que proporcionem esforços e taxas de remoção constantes, evitando assim comprometer a vida útil da ferramenta e a qualidade das superfícies maquinadas.

Com a abordagem às estratégias apresentadas não se pretendeu explorar de forma exhaustiva todas as alternativas disponíveis e muito menos fazer uma avaliação qualitativa dos diferentes programas existentes no mercado. A adopção de determinado programa *CAM* ou *CAD/CAM* deve ser encarada com base nas características específicas do tipo de peças que se pretende maquinar.

A evolução da *HSM* será baseada na compatibilidade cada vez maior entre o “software” *CAD/CAM* e os controladores das máquinas-ferramenta. Apesar das vantagens já comprovadas da *HSM* a sua aplicação será cada vez mais alargada à maquinagem de aços duros e ao fabrico de pequenos componentes (micromecânica) (*Schulz et al, 2003*). Os comandos numéricos serão cada vez mais rápidos, eliminando os problemas relacionados com o tempo de processamento de bloco. A utilização actual de fusos com esferas recirculantes tenderá a ser substituída por motores lineares, para corresponder às elevadas rotações proporcionadas pelas cabeças de alta frequência. A construção das máquinas tenderá a utilizar materiais leves para fazer face às acelerações, mantendo a rigidez da estrutura. Segundo (*Schulz et al, 2003*) irá também acentuar-se o desenvolvimento da maquinagem a seco ou com utilização da técnica *MQL*. Segundo o mesmo autor, a vida útil das ferramentas de corte será controlada pelo próprio sistema em tempo real, assim como a correcção de possíveis desequilíbrios. Esta evolução aponta para uma necessidade cada vez maior de cooperação e coordenação de equipas multidisciplinares de pesquisa e desenvolvimento. Como consequência da evolução prevista, será cada vez mais exigente o perfil de formação dos técnicos e operadores das máquinas-ferramenta do futuro.

3 MAQUINAGEM A ALTA VELOCIDADE – “ESTADO DA ARTE”

A maquinagem a alta velocidade e a utilização de ligas de alumínio tem registado um interesse crescente nos últimos anos. O desempenho das máquinas-ferramenta e os níveis de qualidade exigidos nas indústrias de moldes, automóvel e aeronáutica, têm impulsionado a pesquisa das melhores soluções no sentido de conseguir otimizar os processos e obter superfícies maquinadas com elevados padrões de qualidade e em tempos cada vez mais curtos.

O estabelecimento de parcerias entre as multinacionais que dominam o mercado mundial e as pequenas empresas locais através da subcontratação, fez com que a maquinagem a alta velocidade se tenha começado a estender a sectores onde não seria de prever a sua utilização.

O grande número de factores que afectam a maquinagem a alta velocidade, em especial as operações de fresagem, abriu um vasto leque de áreas de investigação. Cita-se a construção das máquinas-ferramenta, o desenvolvimento dos controladores, as ferramentas de corte, os sistemas de refrigeração / lubrificação, a optimização dos parâmetros de corte, a criação de percursos das ferramentas e estratégias de maquinagem, a integração CAD/CAM, a análise de vibrações, a modelação da formação da apara.

Segundo (*Balkrishna et al, 2001*), a maquinagem a alta velocidade tem sido reconhecida como uma das chaves no fabrico de componentes em alumínio, devido a três condições essenciais: - Em primeiro lugar, com alta velocidade, uma simples passagem pode ser suficiente para obter um bom acabamento superficial. Segundo, porque as baixas forças de corte geradas permitem a maquinagem de paredes finas. Por último, verifica-se que não há formação de aresta postiça de corte, o que contribui para a melhoria da qualidade das superfícies obtidas.

A rugosidade superficial é normalmente o principal factor utilizado para caracterizar as superfícies técnicas. A obtenção da rugosidade superficial desejada é da máxima importância para o desempenho funcional dos componentes (*Bernardos et al, 2003*). Contudo, a influência de inúmeros factores, impossíveis de controlar, torna difícil a tarefa de encontrar um modelo de previsão deste parâmetro, aplicável a todas as situações.

Os mesmos autores resumiram num diagrama, os principais factores que influenciam a rugosidade superficial. Esse diagrama é reproduzido na figura 3.1

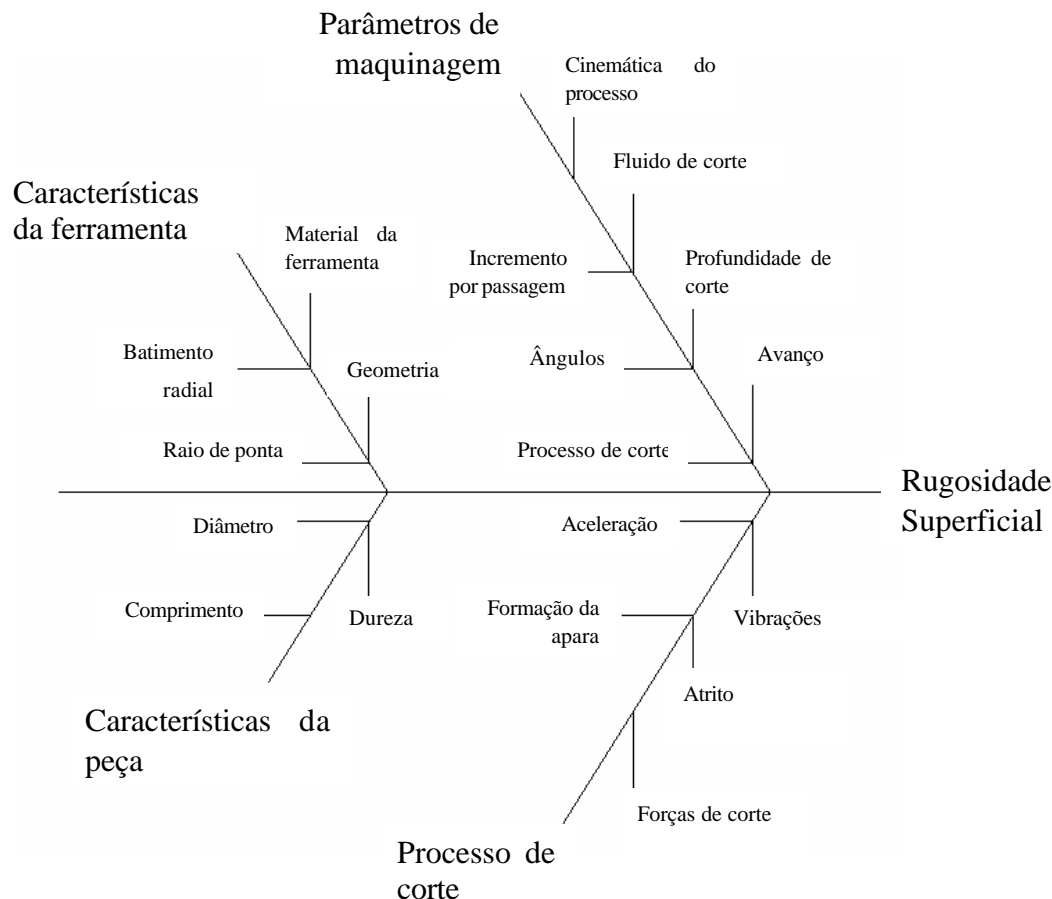


Figura 3.1 Parâmetros que afectam a rugosidade superficial (Bernardos et al, 2003)

(Balkrishna et al, 2001), estudaram o facejamento de uma liga de alumínio, 7075-T6 com pastilhas de diamante e de carbonetos sinterizados não revestidos. Utilizaram uma máquina com uma rotação máxima de 10.000 rpm e avanços programáveis até 16,51 m/min. A gama de velocidades de corte, avanços por dente e profundidades de corte foi respectivamente de 1067-1676 m/min; 0,1-0,38 mm/dente e 0,76-2,29 mm.

Avaliaram a rugosidade das superfícies e tensões residuais. Verificaram que as tensões residuais de compressão aumentavam com o aumento da velocidade de avanço, enquanto que o aumento da velocidade de corte e a profundidade de passagem produziam um efeito contrário.

Verificaram também uma melhoria da rugosidade superficial para velocidades de corte até 1524 m/min. Acima deste valor os resultados pioravam.

Os modelos baseados na rugosidade superficial obtida ou nas forças de corte, são dos mais utilizados para controlar e otimizar os processos de corte e obter uma maior precisão dimensional.

(Baek *et al*, 2001), estudaram a otimização do avanço em operações de facejamento, utilizando um modelo baseado na previsão da rugosidade superficial. A previsão da rugosidade teórica teve por base a geometria da ferramenta e o intervalo de valores de avanço a utilizar. Procederam à maquinagem das superfícies e à medição posterior da rugosidade. Os valores obtidos revelaram uma boa aproximação entre os valores teóricos e experimentais.

Segundo (Kim *et al*, 1999), o principal objectivo da análise quantitativa da rugosidade superficial consiste na identificação de um pequeno conjunto de parâmetros de maquinagem importantes na sua caracterização. Daí a grande variedade de trabalhos que têm sido desenvolvidos de forma a estabelecer relações entre os parâmetros de maquinagem.

(Kim *et al*, 1999), desenvolveram um método matemático designado por “*método da sobreposição de textura*”, para avaliar a rugosidade das superfícies obtidas por fresagem. No desenvolvimento deste método foram utilizadas ferramentas de topo esférico, de topo raso e com raio de canto, de forma a introduzir o raio de canto da ferramenta como variável. Foi também considerado o batimento radial da ferramenta.

O plano experimental foi realizado sobre superfícies planas inclinadas para ultrapassar as dificuldades de utilização do rugosímetro em geometrias mais complexas. O material ensaiado foi o aço SKD11 (norma JIS) com dureza 350 HB, utilizado na indústria automóvel.

Nas condições de ensaio, estes investigadores conseguiram exprimir a amplitude máxima de rugosidade como uma função do avanço por dente, penetramento radial, profundidade de corte e geometria da ferramenta e da peça. Os valores teóricos e medidos apresentaram uma boa correlação. No entanto, quando o penetramento radial atingiu um valor máximo, havia uma distorção da trajectória, causada pela flexão da ferramenta, devido ao aumento da força de corte.

Apesar de (Kim *et al*, 1999) afirmarem que este método pode ser aplicado para melhorar a eficiência de processos de maquinagem a três ou mais eixos, esta opinião é discutível, devido à geometria da peça usada nos testes. Utilizando fresas de topo esférico para maquinar geometrias complexas, o incremento da coordenada Z, provoca uma alteração do raio de corte da ferramenta, ou seja, os parâmetros de corte variam constantemente, contrariamente ao que acontece na maquinagem de superfícies planas inclinadas.

Os estudos actualmente realizados têm habitualmente como suporte os dados recolhidos a partir de sistemas de aquisição em tempo real instalados na máquina. As vibrações são cada vez mais um factor a considerar na análise das condições da máquina ferramenta, mas também na previsão da rugosidade das superfícies maquinadas e na vida da ferramenta.

Segundo (Warnecke *et al*, 2002), devido ao curto tempo de contacto entre a aresta de corte e a apara formada, as elevadas taxas de deformação e temperaturas atingidas pela peça e pela ferramenta, não podem ser interpretadas pelos métodos tradicionais. Nas gamas de velocidade geralmente utilizadas, a força de corte diminui com o aumento da velocidade. Estes investigadores realizaram um conjunto de testes com vários materiais, com o objectivo de descrever a formação da apara a alta velocidade. Utilizaram para o efeito uma ferramenta monocortante.

Verificaram que a apara serrilhada é uma característica comum a todos os materiais ensaiados, verificando-se a formação de apara contínua nos materiais com baixas propriedades mecânicas.

Foi possível confirmar que a formação de apara serrilhada é influenciada pela velocidade de corte e pelo material da peça. A segmentação da apara foi medida por emissão acústica devido às limitações dinâmicas dos sensores de força usados nos processos convencionais. A gama de frequência do sensor utilizado situa-se entre os 250 e 2000 kHz.

Na figura 3.2 estão representados os resultados obtidos.

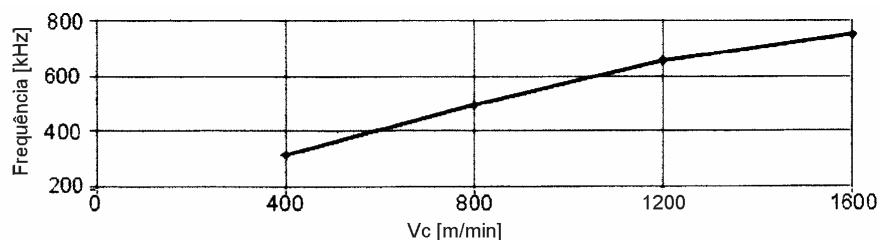


Figura 3.2 Frequência de segmentação da apara na maquinagem do aço endurecido 40 CrMnMo 7
(Warnecke et al, 2002)

Como se pode verificar na figura 3.2, a segmentação da apara aumenta de forma linear com o aumento da velocidade de corte.

(Brinksmeier et al, 2002), estudaram a influência das propriedades do material nas forças de corte, qualidade das superfícies e formação da apara no torneamento a alta velocidade de aços ao carbono com diferentes tamanhos de grão.

Verificaram que, atingida a alta velocidade, havia uma redução das forças de corte, conforme ilustrado na figura 3.3.

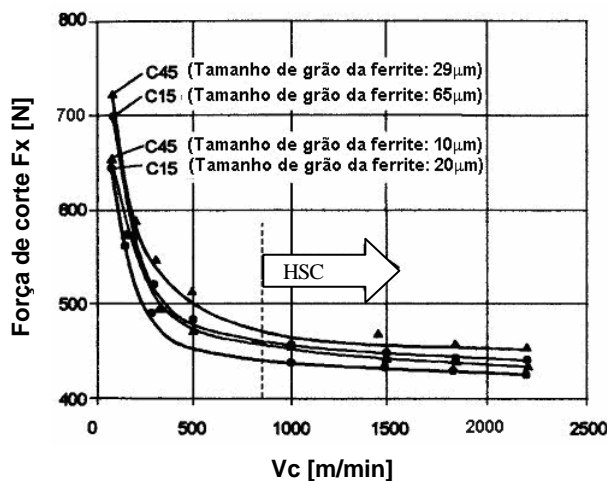


Figura 3.3 Influência da velocidade de corte e do tamanho de grão nas forças de corte (Brinksmeier et al, 2002)

A medição da rugosidade superficial permitiu concluir que na gama de velocidades correspondente a alta velocidade, a qualidade das superfícies melhorou, como pode ser observado na figura 3.4.

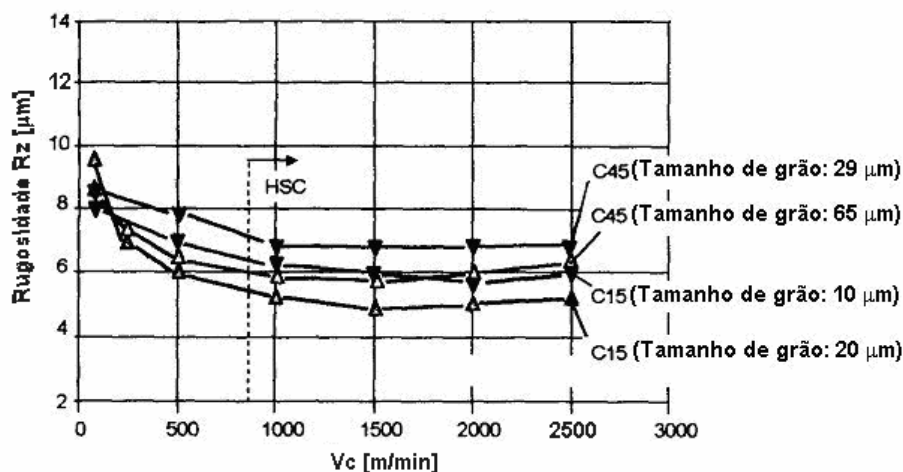


Figura 3.4 Influência da velocidade de corte na qualidade superficial (*Brinksmeier et al, 2002*)

Os resultados mostraram também que a segmentação da apara aumenta, com o aumento da velocidade de corte e do tamanho de grão. As tensões residuais aumentaram apenas ligeiramente com o aumento da velocidade de corte.

A existência de vibrações durante o processo de corte provoca ondulações na superfície maquinada (*Ikua et al, 2002*). Este efeito pode ser atribuído a várias causas como a pouca rigidez da máquina ferramenta ou da peça, ou ao deficiente mecanismo de fixação da ferramenta. As vibrações podem causar uma redução da vida útil da ferramenta, ruído excessivo, degradação dos rolamentos da árvore, imprecisão dimensional da peça maquinada e uma insuficiente qualidade das superfícies maquinadas.

O torneamento e a fresagem plana têm sido utilizados por muitos investigadores para estudar o fenómeno das vibrações na maquinagem. Recentemente começaram também a ser utilizadas ferramentas de topo esférico devido à sua crescente utilização na maquinagem de superfícies complexas.

(*Altintas*), citado por (*Ikua et al, 2002*), avaliaram a instabilidade na maquinagem com ferramentas de topo esférico.

Estes estudos consideravam apenas as situações em que a direcção de avanço é invariável no tempo, não havendo por isso variação na espessura da apara. No entanto, na maquinagem de geometrias complexas a direcção de avanço varia com o tempo, variando a

espessura da aparta com a rotação da ferramenta e com o tempo. Esta variação torna difícil a criação de modelos analíticos para prever as situações em que ocorrem vibrações.

(Ikua *et al*, 2002) estudou o fenómeno das vibrações na maquinagem de superfícies côncavas e convexas, utilizando fresas de topo esférico. As situações ensaiadas são as indicadas na figura 3.5.

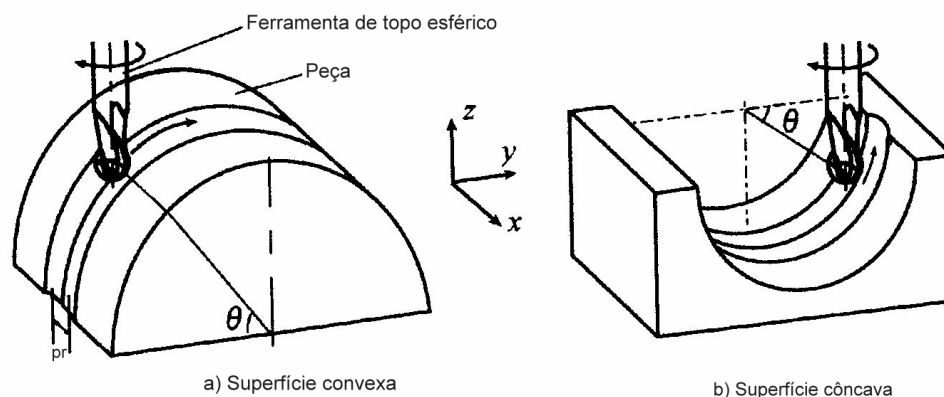


Figura 3.5 Maquinagem côncava e convexa com ferramenta de topo esférico (Ikua B. *et al*, 2002)

Na figura 3.5 pode observar-se o percurso da ferramenta nas situações de maquinagem ensaiadas. O ângulo θ é o ângulo de posição da ferramenta e pr o incremento lateral (penetramento radial).

Os parâmetros de corte ensaiados foram referenciados relativamente ao incremento lateral e à direcção de avanço da ferramenta. Foram avaliadas as situações correspondentes ao incremento lateral à esquerda com movimento de corte ascendente (L-U – Left, Upward) e incremento lateral à direita com movimento de corte ascendente (R-U – Right, Upward).

Foram medidas as forças de corte e o respectivo espectro de potência como exemplificado na figura 3.6.

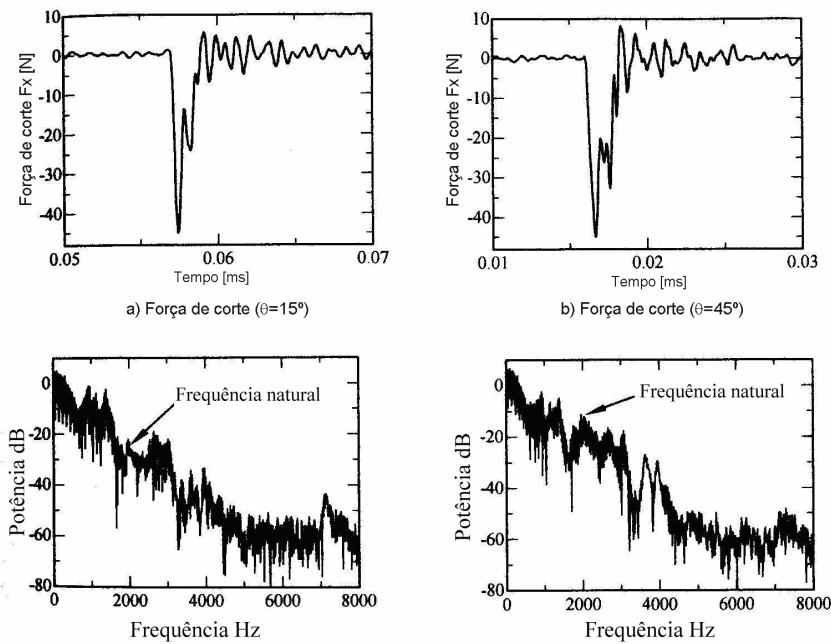


Figura 3.6 Forças de corte e respectivo espectro de potência (Ikua B. et al, 2002)

Foi possível verificar que para uma frequência próxima da frequência natural de vibração da máquina (2000 Hz), ocorria vibração para um ângulo θ de 45° , o que não acontecia para um ângulo de 15° .

A influência do ângulo de posição da ferramenta nos limites de estabilidade foi analisada para as situações de incremento lateral à direita e à esquerda na maquinagem ascendente. Na figura 3.7 são apresentados os resultados. Os símbolos “o” e “?” representam as zonas de estabilidade e de instabilidade respectivamente.

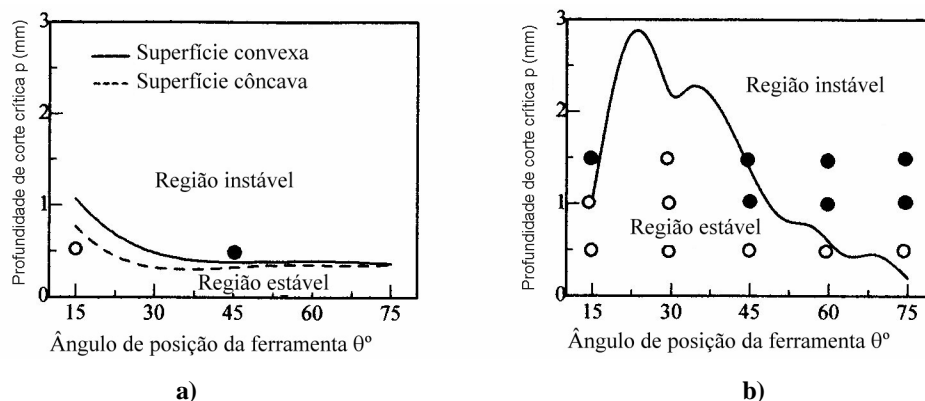


Figura 3.7 Influência do ângulo de posição da ferramenta nos limites de estabilidade – a) maquinagem ascendente, incremento lateral à esquerda; b) maquinagem ascendente, incremento lateral à direita para uma superfície convexa (Ikua B. et al, 2002)

As figuras mostram uma elevada estabilidade para ângulos de posição baixos (entre 20 e 35°). A figura 3.8 a) mostra ainda uma maior estabilidade na maquinagem de geometrias convexas. Utilizando um incremento lateral à direita, as condições de estabilidade são melhores do que com o incremento lateral à esquerda. Estas duas situações correspondem efectivamente às condições de fresamento em oposição (incremento lateral à esquerda) e em concordância (incremento lateral à direita).

Os efeitos da fresagem em concordância e em oposição foram também analisados por (Vivancos, *et al*, 2004). Com os ensaios que realizou pretendeu obter correlações que permitissem prever a rugosidade média aritmética (R_a) em função dos parâmetros processuais, na maquinagem de aços temperados para o fabrico de moldes de injeção.

Para esse efeito usou fresas de topo esférico de carbonetos sinterizados para realizar a operação de acabamento em provetes representados na figura 3.8.

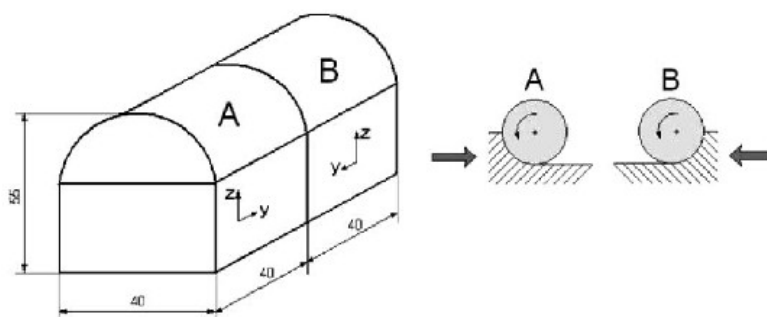


Figura 3.8 Provette de ensaio (Vivancos J. *et al*, 2004)

As posições A e B correspondem a situações de maquinagem em concordância e em oposição, respectivamente. Na figura 3.9 estão indicadas as posições nas quais foram medidos os valores de R_a .

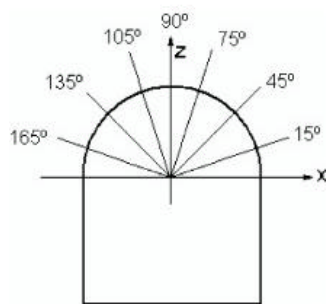


Figura 3.9 Posições para medição da rugosidade (raio 20 mm) (Vivancos J. *et al*, 2004)

Entre outras conclusões, (Vivancos *et al*, 2004) verificaram que para valores mais elevados da profundidade de corte radial (pr) havia um aumento do valor de Ra . Verificaram também que para a maquinagem em oposição os valores de Ra eram ligeiramente superiores aos obtidos na maquinagem em concordância. Outra conclusão foi a de que o penetramento radial era o factor que mais influenciava a qualidade das superfícies.

Feita a análise ao trabalho de vários investigadores nesta área, há um aspecto importante que deve ser considerado. Os testes realizados incidem geralmente sobre geometrias que embora possam ser consideradas geometrias complexas, não deixam de ser geometrias elementares onde a aplicação dos parâmetros de maquinagem e a avaliação das superfícies obtidas é facilitada.

Contudo, a extrapolação dos resultados relativamente a outras geometrias pode ser na maioria dos casos considerada exagerada. Se analisarmos uma geometria em que cada movimento elementar da ferramenta se processa a cada momento de acordo com interpolações nos três eixos simultaneamente, (superfícies complexas) como é o caso da figura 3.10, surgem de imediato outros factores que intervêm no processo.

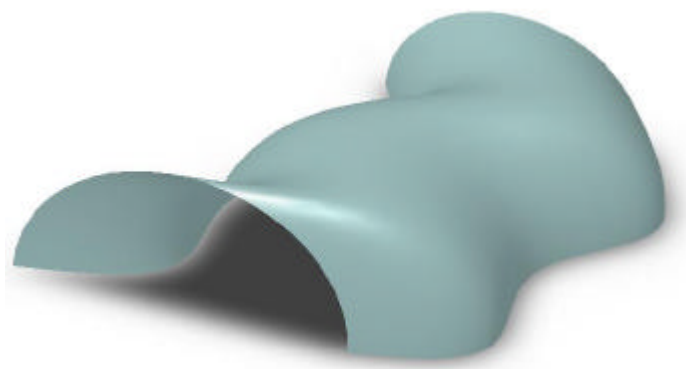


Figura 3.10 Superfície complexa

Estas geometrias, habituais em vários tipos de moldes, permitem na maioria das situações, a análise da qualidade das superfícies por inspeção visual ou através da medição dos valores da rugosidade. No entanto, a análise dinâmica do processo de maquinagem resulta bem mais complexa. Isto, porque a ferramenta muda continuamente de trajectória, resultando numa constante transição côncava/convexa, ascendente/descendente. A programação das operações só pode realizar-se com recurso a programas CAM, onde a opção por uma velocidade de rotação resultará favorável em algumas zonas da geometria e

desfavorável noutras. As estratégias de maquinagem constituem outro dos motivos de reflexão. Os programas são também muito extensos, entrando aqui um outro factor que é a capacidade do controlador através da função “*look-ahead*”. A capacidade de aceleração/desaceleração dos motores dos eixos é outro dos factores que pode ter consequências no aspecto e qualidade das superfícies obtidas.

Em suma, a utilização dos resultados obtidos nos trabalhos desenvolvidos pelos diversos investigadores deverá ser sempre precedida de uma análise cuidada da situação particular em que os mesmos foram obtidos. Esses resultados deverão por isso ser considerados apenas como ponto de partida, não dispensando uma avaliação ponderada do caso em estudo e a realização de ensaios de verificação. A experiência acumulada nas várias situações de maquinagem que surgem aos programadores diariamente, são porventura a mais valia que permitirá otimizar tempos e reduzir etapas na selecção dos parâmetros e estratégias de maquinagem.

Atendendo à rápida evolução que se verifica actualmente ao nível do software e da electrónica, a sua aplicação às máquinas-ferramenta, caminhará no sentido de compatibilizar cada vez mais o CAM com o CNC, através da evolução dos pós-processadores. Os controladores das máquinas tendem cada vez mais para uma arquitectura aberta, tipo PC. Residirá aqui a chave para a criação de “software” que permita a leitura directa dos modelos criados no CAM e a geração do programa CNC, sem a necessidade de pós-processamento de dados. Desta forma será possível aproveitar ao máximo os recursos da máquina-ferramenta e eliminar as limitações impostas pelo pós-processador.

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.1 Introdução

O plano de ensaios foi delineado e executado, com o objectivo de estabelecer uma comparação da maquinagem efectuada com a rotação “standard” da máquina-ferramenta e com recurso a uma turbina pneumática de alta rotação.

Em ambos os casos, foram ensaiadas diferentes estratégias de maquinagem, com o intuito de determinar a estratégia mais adequada a cada geometria a maquinar. Foi também analisado o efeito da lubrificação (MQL e abundante) e do método de fresagem (concordante e em oposição).

4.2 Material maquinado

O material maquinado foi uma liga de alumínio fornecida pela empresa *Sunemetal*, com a referência HOGAL 7050. De acordo com a sua composição e propriedades, trata-se de uma liga Alumínio-Zinco que corresponde à liga 7050-T7451, segundo a classificação ASM (*Aerospace Specification Metals, Inc.*). Trata-se portanto de uma liga sujeita a tratamento térmico de estabilização (T7). A sua composição química e propriedades mecânicas e físicas são as que constam da tabela 4.1.

Tabela 4.1 Composição química e propriedades físicas e mecânicas do material maquinado

Composição Química do fabricante [% em peso]	Composição Química [% em peso], segundo classificação ASM	Propriedades mecânicas e físicas
Al – 89,480	87,3-90,3	Dureza Brinell – HB – 163-169
Si – 0,036	Máx. 0,12	Tensão de rotura – 530-588 N/mm ²
Fe – 0,073	Máx. 0,15	Tensão limite de elasticidade – 480-520 N/mm ²
Cu - 2,150	2-2,6	Densidade – 2,83
Mg - 1,994	1,9-2,6	Extensão após rotura – 4-10%
Cr - 0,001	Máx 0,04	
Zn - 6,119	5,7-6,7	
Ti - 0,027	Máx. 0,06	
Zr - 0,102	0,08-0,15	

Esta liga de alumínio é indicada para o fabrico de moldes de injeção, componentes móveis de maquinaria e para o fabrico de protótipos.

O interesse na utilização das ligas de alumínio tem vindo a crescer nos últimos anos devido a vários factores, dos quais se destacam os seguintes:

- ? Possuem boas propriedades, em especial a resistência mecânica, dureza e maquinabilidade.
- ? Permitem a construção de estruturas mais leves o que conduz a equipamentos com menores consumos energéticos
- ? Redução dos tempos de maquinagem
- ? Bom acabamento das superfícies maquinadas

Estes factores contribuem para um aumento crescente na utilização destas ligas, por conseguirem conjugar uma relação qualidade/custo bastante competitiva, relativamente à utilização do aço.

4.3 Ferramentas

As ferramentas utilizadas foram seleccionadas do catálogo *Sandvik*^{®1}. A figura 4.1 ilustra as duas principais geometrias utilizadas, recomendadas para a maquinagem de alumínio.

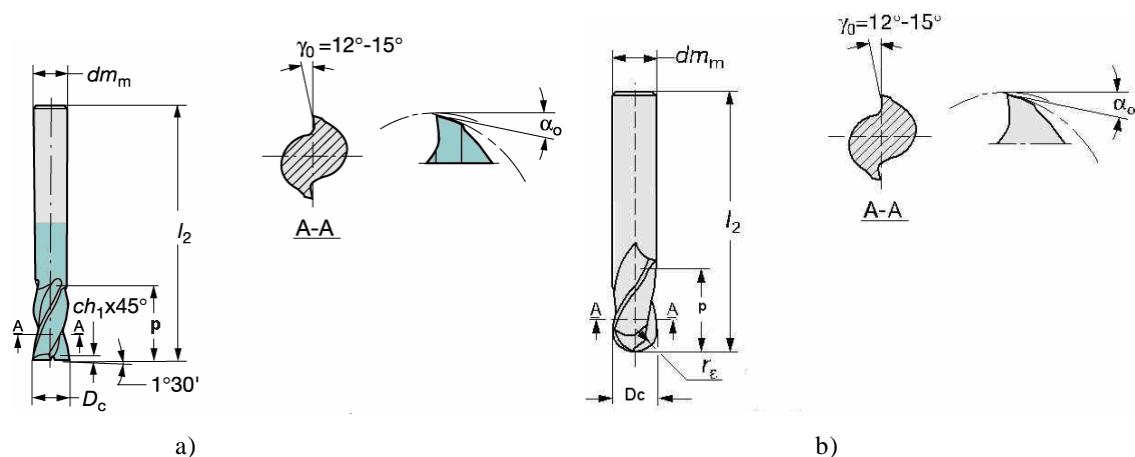


Figura 4.1 Geometria das ferramentas utilizadas: a) ferramenta de topo raso; b) ferramenta de topo esférico

$\gamma_0 = 13-15^\circ$ (conforme informação retirada do catálogo)

¹ Ferramentas e métodos – Fabricação de moldes e matrizes

As geometrias representadas na figura 4.1 correspondem às seguintes ferramentas:

- ? Fresa de topo raso, 2 navalhas, diâmetro $D_c = 6$ mm, Ref.^a **R216.32-06030-AC10A H10F**

Utilizada nas operações de acabamento das superfícies planas

- ? Fresa de topo raso, 2 navalhas, diâmetro $D_c = 8$ mm, Ref.^a **R216.32-08030-AC16A H10F**

Utilizada em operações de desbaste e de acabamento de superfícies planas

- ? Fresa de topo esférico, 2 navalhas, diâmetro $D_c = 6$ mm, Ref.^a **R216.42-06030-AK10A H10F**

Utilizada no acabamento de superfícies curvas e superfícies inclinadas

A montagem destas ferramentas é feita num cone porta pinças, ISO 40

- ? Na operação de contorno exterior dos blocos maquinados foi utilizada a ferramenta representada na figura 4.2:

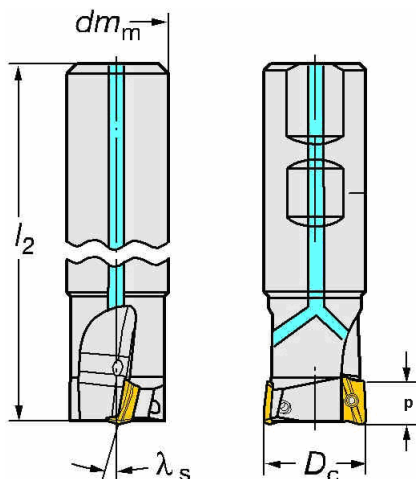


Figura 4.2 Ferramenta usada nas operações de contorno (Sandvik®)

Esta ferramenta é uma fresa de topo raso, com 3 pastilhas, diâmetro $D_c = 25$ mm e tem a referência:

- ? **R390-025A25-11M**, com os insertos R390-11T3 04E-NL

A montagem da ferramenta é feita num cone Weldon, ISO 40

4.4 Centro de maquinagem utilizado

Para a realização dos ensaios, foi utilizado um Centro de Maquinagem Vertical, da marca Cincinnati®, modelo Arrow 2, instalado nas Oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, da Escola Superior de Tecnologia de Viseu (figura 4.3).

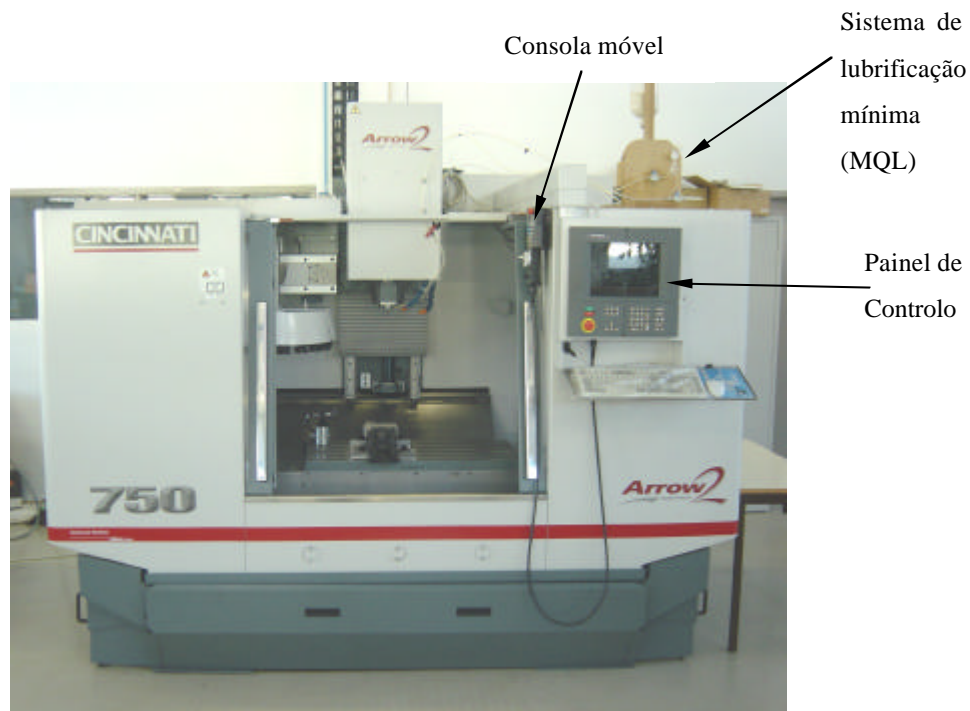


Figura 4.3 Centro de maquinagem Cincinnati®, Arrow 750 utilizado nos ensaios

Na tabela 4.2 são apresentadas as características da máquina

Tabela 4.2 Características do centro de maquinagem usado nos ensaios, de acordo com o manual da máquina

<ul style="list-style-type: none"> - Controlador: - Dimensões de trabalho X,Y,Z: - Carga máxima sobre a mesa de trabalho: - Movimentos rápidos, X,Y,Z: - Máxima velocidade de avanço programável: - Repetibilidade: - Precisão: - Aceleração / Desaceleração X,Y,Z: - Tempo de processamento de bloco: 	<p>Siemens, Acramatic 2100E</p> <p>762x510x510 mm</p> <p>750 kg</p> <p>30 m/min</p> <p>15 m/min</p> <p>± 0,3 mm</p> <p>± 0,1 mm</p> <p>6 m/s²</p> <p>7,8 ms</p>
<ul style="list-style-type: none"> - Fixação de ferramentas na árvore: - Gama de rotações: - Tempo para atingir a rotação máxima: - Potência máxima: - Potência em contínuo: - Potência à rotação máxima: - Binário disponível em contínuo: - Capacidade do armazém de ferramentas: - Peso máximo da ferramenta: - Diâmetro máximo da ferramenta: - Comprimento máximo da ferramenta: - Tempo de troca da ferramenta (metal-metal): - Sistema de lubrificação / refrigeração: - Capacidade do depósito de lubrificante: 	<p>Cone ISO 40</p> <p>0 – 10.000 rpm</p> <p>1,8 s</p> <p>11 kW</p> <p>9 kW (de 750 a 6000 rpm)</p> <p>5,5 kW</p> <p>114 N.m</p> <p>21</p> <p>6,8 kg</p> <p>160 mm</p> <p>385mm</p> <p>6s</p> <p>20 l/min; 1bar</p> <p>178 l</p>
<ul style="list-style-type: none"> - Kit integral Siemens (figura 4.4) - Windows NT - Processador Siemens PCU50 - Pentium III – 500MHz - Memória RAM – 128Mbytes - Digital Simodrive 611U 	

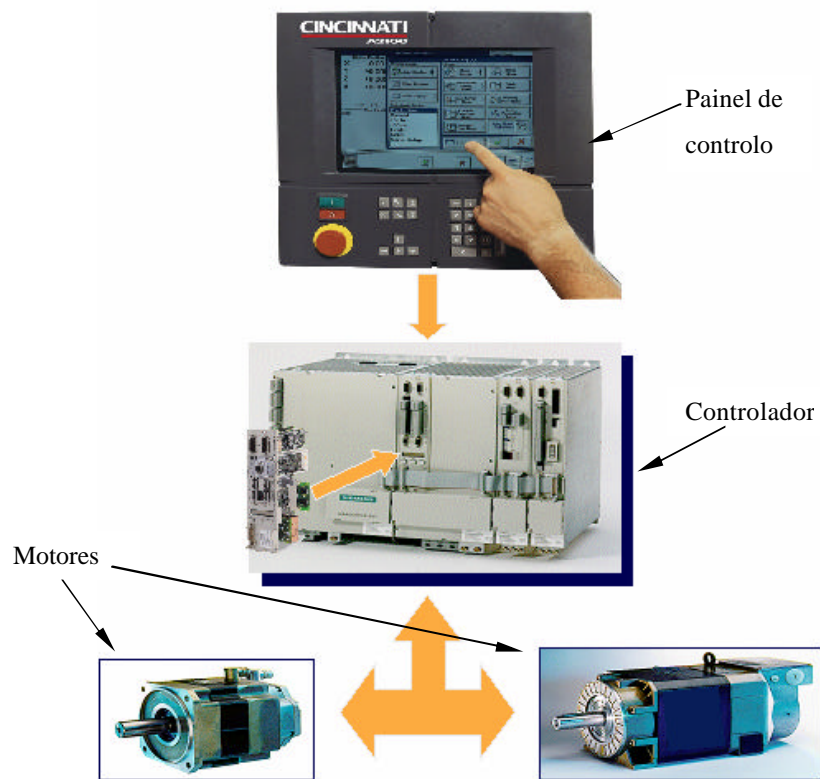


Figura 4.4 Elementos constituintes do Kit Integral Siemens®

O controlador tem códigos opcionais instalados, para activar/desactivar a função alta velocidade (G45 e G45.1 respectivamente).

Na figura 4.5 pode observar-se a consola móvel indicada na figura 4.3.



Figura 4.5 Consola móvel

Esta consola permite ao operador posicionar-se e circular nas proximidades da máquina enquanto executa diversas operações de preparação do trabalho, medição de ferramentas e realização das operações de “Setup”.

A máquina está equipada com um sistema de lubrificação centralizada, comandada pelo controlador que faz a lubrificação dos vários pontos da máquina.

Um acessório importante da máquina é o dispositivo de medição de ferramentas, ilustrado na figura 4.6.

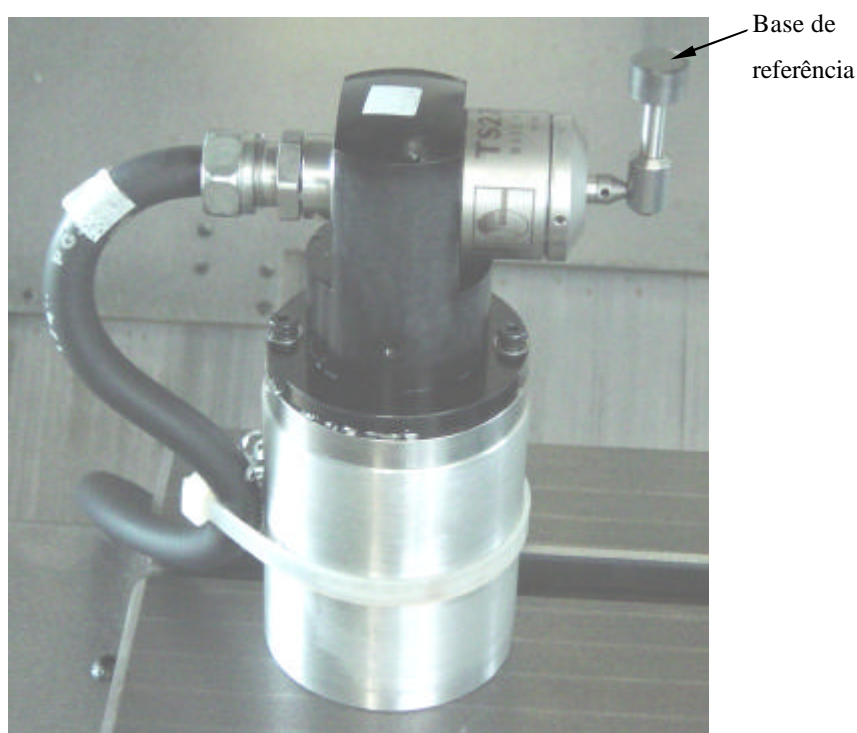


Figura 4.6 Dispositivo para medição de ferramentas (RENISHAW TS27R®)

O dispositivo de medição de ferramentas está fixo na mesa da máquina (canto superior esquerdo). A base de referência (figura 4.6) encontra-se numa posição predefinida e assumida pelo controlador. A medição das ferramentas é feita com base numa rotina criada em modo MDI (*Manual Data Input*). Para que uma ferramenta possa ser medida, terá que ser previamente colocada no armazém de ferramentas e definida em termos de características principais: tipo de ferramenta, diâmetro e comprimento (figura 4.7).

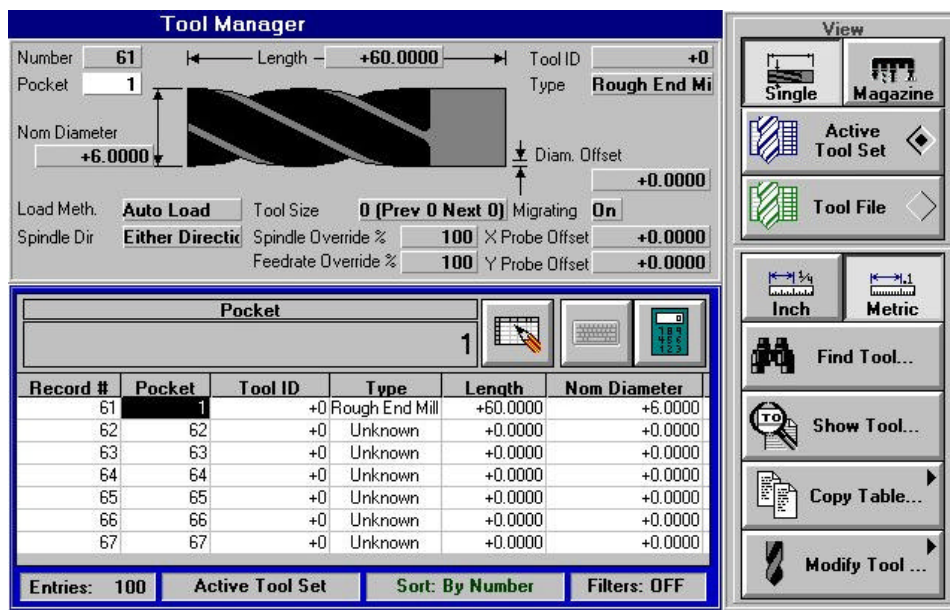


Figura 4.7 Definição da ferramenta

Quando se inicia o processo de medição, a ferramenta é chamada e colocada a rodar no sentido contrário ao sentido de corte, enquanto se desloca em direcção à base de referência. Quando a ferramenta toca a base de referência, provoca uma deflexão da sua haste de suporte cujo valor é definido na fase de programação (normalmente selecciona-se um valor próximo de 0,1 mm). A ferramenta sobe então ligeiramente e repete o movimento contra a base de referência. Depois deste segundo toque, o controlador assume de imediato o comprimento da ferramenta.

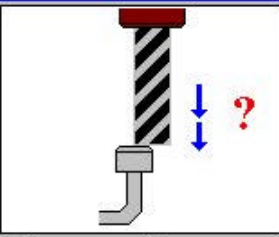
Na figura 4.8 são apresentados os principais passos desta programação, acompanhada por uma representação gráfica de cada parâmetro.

Resident Assistant Programmer

G68 P1 G90 X0 Y0 T3 Q0 W2 D0.1

Set Tool Length (G68 P1)

Probe Offset X:	(X):	+0.00000
Probe Offset Y:	(Y):	+0.00000
Tool ID:	(T+):	+3
Probe Process:		Double Hit
Retract Distance:	(W):	+2.00000
Overtravel Distance:	(D):	+0.10000
Abs/Inc: Absolute		

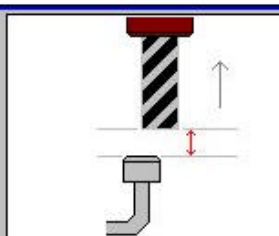


a) Contacto com a base de referência: dois toques

G68 P1 G90 X0 Y0 T3 Q0 W2 D0.1

Set Tool Length (G68 P1)

Probe Offset X:	(X):	+0.00000
Probe Offset Y:	(Y):	+0.00000
Tool ID:	(T+):	+3
Probe Process:	(Q):	Double Hit
Retract Distance:	(W):	+2.00000
Overtravel Distance:	(D):	+0.10000
Abs/Inc: Absolute		

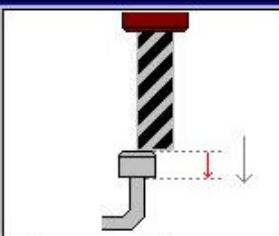


b) Subida da ferramenta após a medição: 2 mm

G68 P1 G90 X0 Y0 T3 Q0 W2 D0.1

Set Tool Length (G68 P1)

Probe Offset X:	(X):	+0.00000
Probe Offset Y:	(Y):	+0.00000
Tool ID:	(T+):	+3
Probe Process:	(Q):	Double Hit
Retract Distance:	(W):	+2.00000
Overtravel Distance:	(D):	+0.10000
Abs/Inc: Absolute		



c) Valor da deflexão a provocar na haste que contém a base de referência: 0,1 mm

Figura 4.8 Programação para medição do comprimento de uma ferramenta

Na figura 4.9, pode observar-se o armazém de ferramentas, do tipo tambor rotativo, com capacidade para 21 ferramentas.

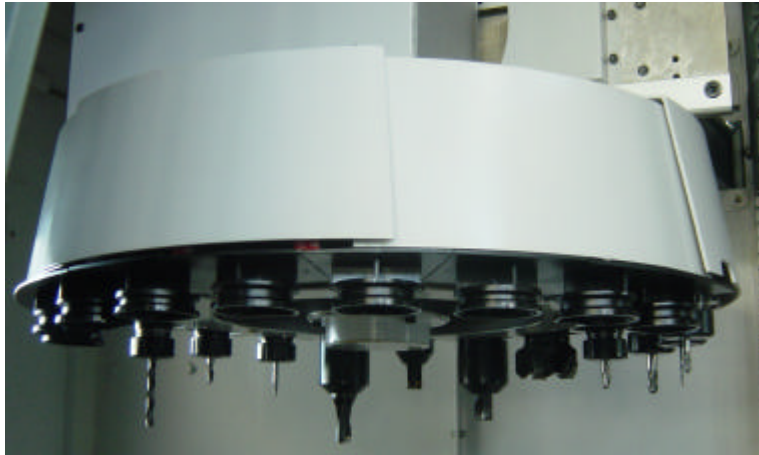


Figura 4.9 Armazém para 21 ferramentas, tipo tambor rotativo

A turbina de alta rotação utilizada é da marca Air Turbine Tools®, modelo 230 XJS, apresentada na figura 4.10.

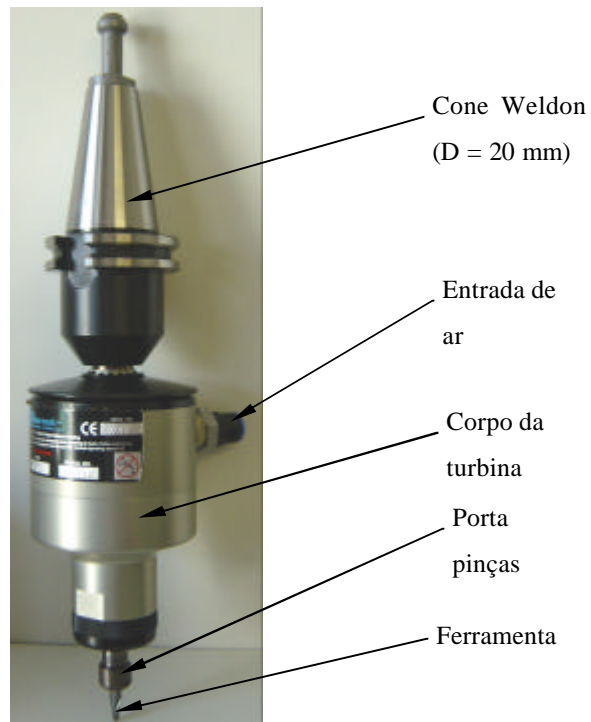


Figura 4.10 Turbina de 40.000 rpm, marca Air Turbine Tools®, modelo 230XJS

As características da turbina são as que se indicam na tabela 4.3.

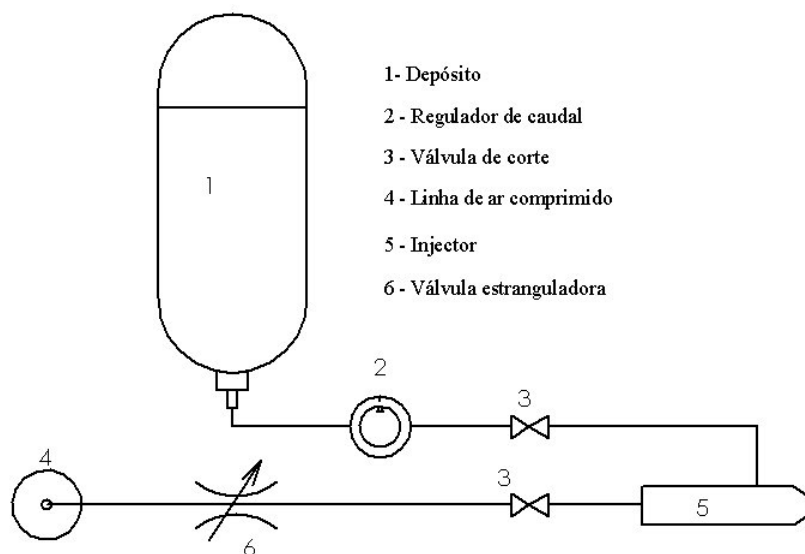
Tabela 4.3 Características da turbina de alta rotação

- Rotação:	40.000 rpm
- Potência:	1,04 kW
- Pressão de alimentação:	6,2 bar
- Consumo de ar:	10,34 l/s
- Diâmetro máximo da ferramenta:	6 mm
- TIR – Taxa de batimento radial:	menor que 0,0127 mm

O motor é constituído por uma dupla turbina accionada por ar comprimido e está equipada com rolamentos cerâmicos. Não necessita de lubrificação. A sua montagem é feita num cone Weldon ($D = 20$ mm), conforme indicado na figura 4.10. Este equipamento é colocado no armazém de ferramentas e introduzido na programação como qualquer ferramenta. É necessário atribuir o valor zero à rotação da ferramenta (S0).

4.5 Sistema desenvolvido para a lubrificação mínima

O centro de maquinagem utilizado não dispunha de um sistema de lubrificação que permitisse a utilização de quantidades mínimas de lubrificante (MQL – “*Minimal Quantity of Lubricant*”). Para evitar a necessidade de proceder a alterações ao sistema de lubrificação da máquina, foi construído um sistema independente para aplicação desta técnica. O esquema do dispositivo encontra-se representado na figura 4.11.

**Figura 4.11** Esquema do dispositivo de lubrificação mínima desenvolvido

A construção do dispositivo teve em conta a sua funcionalidade: lubrificação, refrigeração e remoção das aparas da zona de corte.

O seu funcionamento é o seguinte: - Abrem-se as válvulas do ar comprimido e do fluido lubrificante. Este escoar por gravidade e é arrastado pela corrente de ar que atravessa o injector. Obtém-se assim um jacto constituído por uma névoa de partículas atomizadas, que são direccionadas para a zona de corte. Nos ensaios realizados foi usado um caudal de lubrificante de **30 ml/h**. O lubrificante é composto por uma emulsão a 5% de óleo de corte da marca *Castrol*[®], com a referência *Syntilo R Plus*.

Com o regulador de caudal utilizado, é possível variar o caudal de lubrificante de 0 a 300 ml/h.

Na figura 4.12, pode observar-se o dispositivo construído.

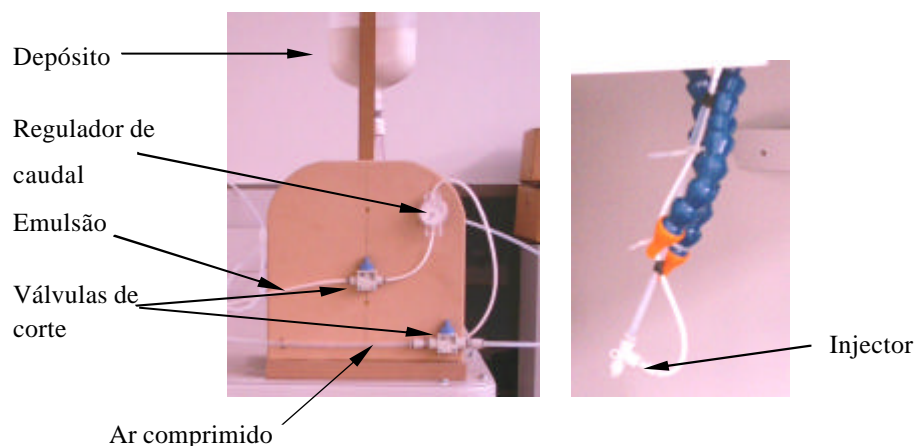


Figura 4.12 Montagem do dispositivo de lubrificação mínima construído

Para facilitar o direccionamento do jacto da mistura, aproveitaram-se as ponteiros do sistema de lubrificação da máquina às quais se prenderam os tubos por meio de abraçadeiras.

No final do programa, é necessário fechar as válvulas de ambas as tubagens para interromper o caudal da mistura.

4.6 Métodos de caracterização

A caracterização das peças maquinadas foi efectuada utilizando os seguintes equipamentos:

- **Microscópio da marca Zeiss, modelo Axiotech 100 HD**, apresentado na figura 4.13, equipado com uma câmara de alta resolução SONY – SSC-C370P, através da qual foram captadas as imagens das peças observadas.

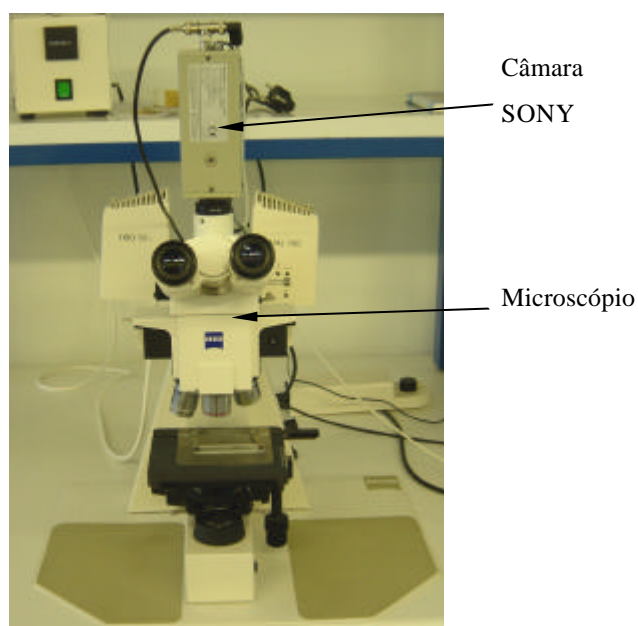


Figura 4.13 Microscópio Zeiss®, modelo Axiotech 100 HD¹

Através da sua ligação a um PC por intermédio de uma placa TV, esta câmara permite a aquisição e gravação das imagens.

Com este microscópio foram observadas as superfícies maquinadas nos vários ensaios, sempre que tal se justificava.

A pouca profundidade de campo, característica destes equipamentos, impossibilita algumas observações, particularmente o desgaste nas ferramentas de corte e alguns pormenores das superfícies maquinadas. Por esta razão, foi utilizada de forma complementar uma **máquina fotográfica digital** da marca **SONY®**, modelo **DSC-P7**, com zoom óptico 3X e resolução máxima de 3.2 Mpixel. A objectiva da máquina era apoiada sobre uma lente com

¹ Laboratório de Tecnologia Mecânica do DEMGI - ESTV

ampliação de 15X, procedendo-se depois à focagem e obtenção da fotografia. O esquema apresentado na figura 4.14 ilustra este procedimento.

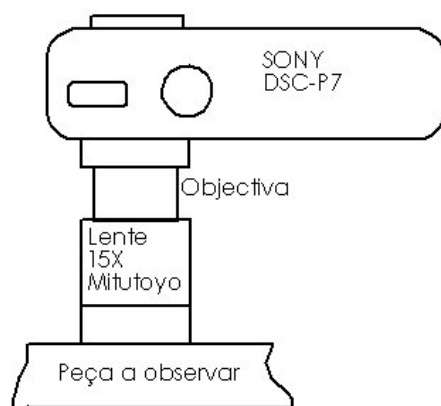


Figura 4.14 Utilização da máquina fotográfica na obtenção de imagens

A medição da rugosidade superficial foi efectuada com o rugosímetro de agulha **HOMMELWERKE®-T 1000**, que pode observar-se na figura 4.15.



Figura 4.15 Rugosímetro HOMMELWERKE®-T 1000¹

A medição da rugosidade foi realizada de acordo com a norma DIN 4768. Foram seleccionados os parâmetros R_a (rugosidade média aritmética) e R_t (amplitude máxima de rugosidade).

A figura 4.16 ajuda a definir os dois parâmetros referidos.

¹ Laboratório de Tecnologia Mecânica do DEMGI - ESTV

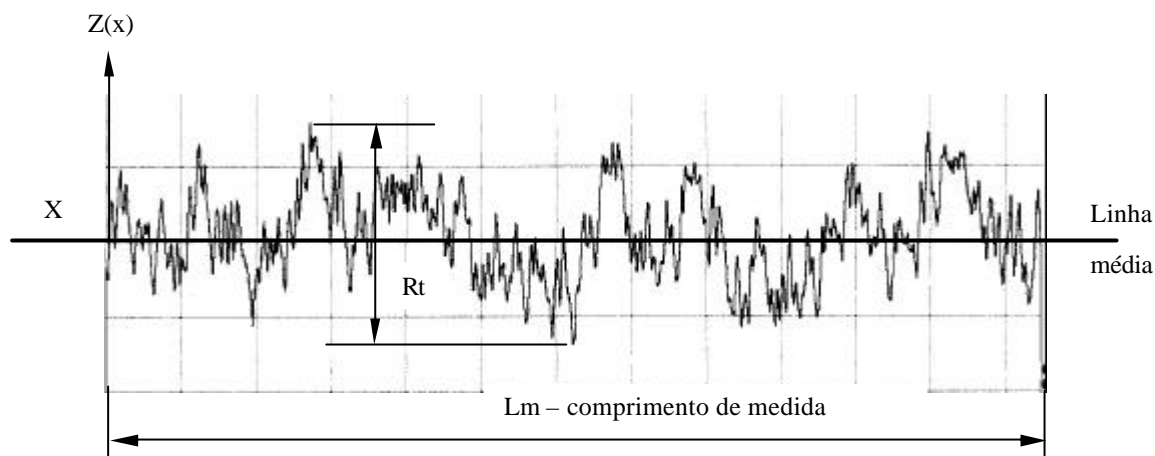


Figura 4.16 Definição dos parâmetros de rugosidade avaliados

O parâmetro R_a corresponde à média aritmética dos valores absolutos das ordenadas dos pontos do perfil em relação à linha média.

Definindo a função $Z(x)$ como sendo a distância entre cada ponto do perfil e a linha média no comprimento de medida, L_m , temos:

$$R_a = \frac{1}{L_m} \int_0^{L_m} |Z(x)| dx \quad (4.1)$$

O parâmetro R_t corresponde à diferença de altura entre o pico mais elevado e o vale mais profundo, medido no perfil de ondulação ao longo do comprimento de cálculo, L_m .

A precisão dimensional das peças foi avaliada com uma máquina de medição tridimensional Mitutoyo – B715, representada na figura 4.17.



Figura 4.17 Máquina de medição tridimensional Mitutoyo® – B715S¹

A máquina representada na figura 4.17 tem as seguintes características:

- ? Resolução mínima: 0,0005 mm;
- ? Capacidade de medida dos eixos X, Y, Z: 700; 1500; 600;
- ? Acessórios complementares: ponteiros Renishaw® PH1 e suporte de ponteiros TP2.

¹ Gentileza da empresa MECOIN – Tondela

5 SIMULAÇÃO DA MAQUINAGEM / PEÇA PADRÃO

5.1 Software

Na modelação das peças foi utilizado o programa SolidWorks® 2003. A simulação da maquinagem e a criação dos programas CNC foi realizada com o MasterCam®-SP2.

O SolidWorks® é um programa de modelação de sólidos, de utilização muito intuitiva, que permite proceder à edição e alteração das geometrias básicas usadas na construção do modelo e obter com facilidade os desenhos 2D a partir do modelo 3D.

O MasterCam®, por seu lado, permite importar directamente os modelos criados no SolidWorks®. Tratando-se de um software CAM dos mais antigos do mercado, o programa dispõe de pós-processadores compatíveis com a grande maioria dos controladores instalados nas máquinas CNC existentes.

5.2 Selecção da peça a maquinar / peça padrão

A selecção da peça a maquinar foi objecto de várias etapas de desenvolvimento. Inicialmente foram desenhados alguns protótipos, com o objectivo de avaliar o comportamento da máquina e das ferramentas em situações de maquinagem particularmente complicadas. Pretendeu-se desenvolver uma **peça padrão** que representasse grande parte das superfícies complexas encontradas na prática industrial. De acordo com (*Lacalle et al, 1999*) a utilização de peças padrão para avaliar o desempenho das máquinas-ferramenta, é um procedimento adoptado por várias instituições tais como universidades (Cachan – França; UPV-b – Universidade del País Vasco) e centros de investigação que usam tecnologias de ponta (NCG – NC-Gesellschaft; Mercedes).

A título de exemplo, são apresentadas algumas das geometrias desenvolvidas no decorrer deste trabalho (desde a peça 1 até à peça padrão – peça 5), ilustrando as fases de concepção, simulação da maquinagem e peça maquinada. Nalguns casos, foram recolhidas imagens das observações com o microscópio óptico e com a máquina fotográfica digital (como referido na secção 4.6).

A figura 5.1 mostra a peça 1, onde predomina a geometria circular, com variações de perfil em profundidade, terminando numa cavidade semi-esférica de pequeno diâmetro.

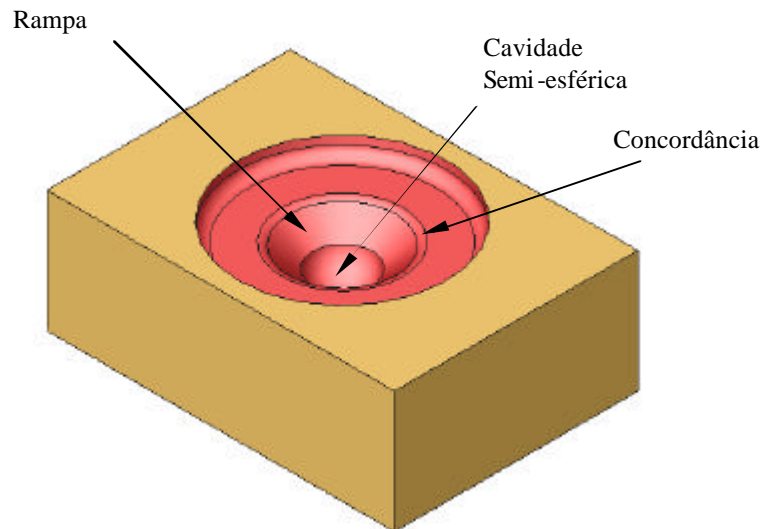


Figura 5.1 Peça 1 - Cavidade

Pretendeu-se com a peça representada na figura 5.1 avaliar o desempenho da ferramenta de topo esférico a maquinar a profundidade máxima da cavidade. A figura 5.2 ilustra o modelo em estrutura de arame (*“wireframe”*).

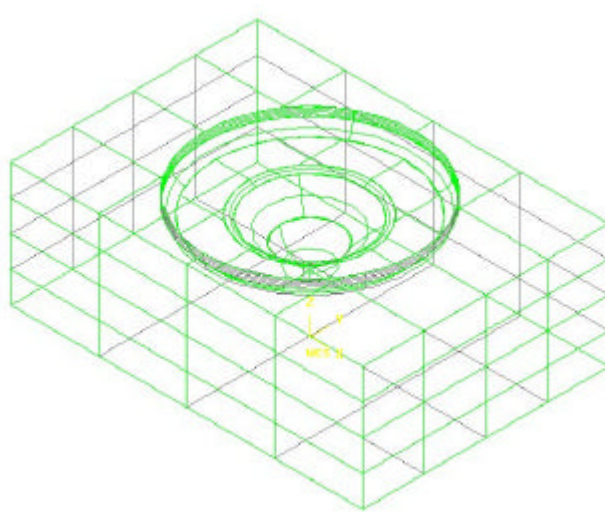
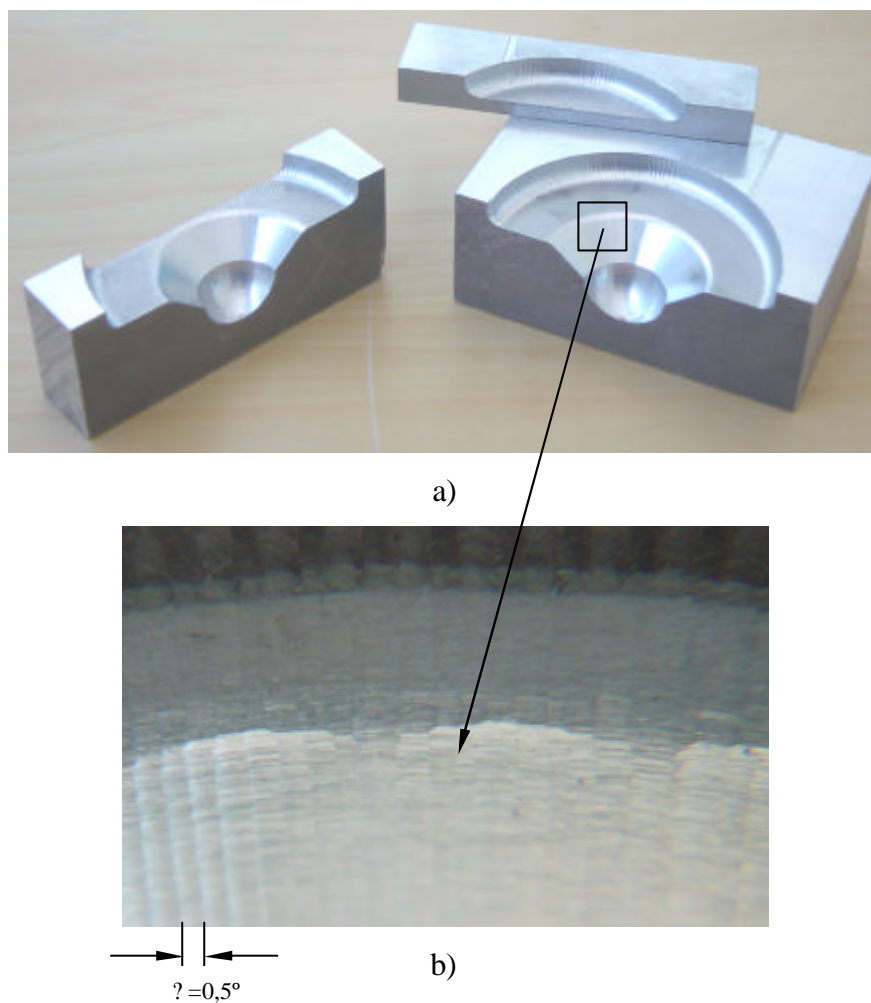


Figura 5.2 Peça 1 – modelo de arame

Esta peça foi maquinada a partir de dois blocos justapostos, permitindo no final obter duas meias peças, facilitando seccionamentos adicionais e mantendo metade da peça tal como maquinada, como pode ser observado na figura 5.3.

**Figura 5.3** Peça 1 maquinada

a) Peça maquinada e seccionada; b) ampliação da zona da rampa

A maquinagem foi realizada seguindo uma estratégia radial. Na figura 5.3 b) é possível observar o incremento radial da ferramenta – “Stepover”. Este ensaio revelou que a escolha do incremento radial resulta numa situação em que nas zonas mais próximas do centro o acabamento é melhor que nas zonas periféricas. Isto deve-se a uma sobreposição mais acentuada entre passagens adjacentes. A melhoria do acabamento nas zonas periféricas implica uma redução do incremento radial, o que conduz ao aumento do tempo de maquinagem.

Na figura 5.4 pode-se observar a peça 2. Procurou-se avaliar o comportamento da ferramenta e a precisão de movimentos da máquina, nas mudanças de direcção, especialmente nos contornos das cavidades de pequena dimensão.

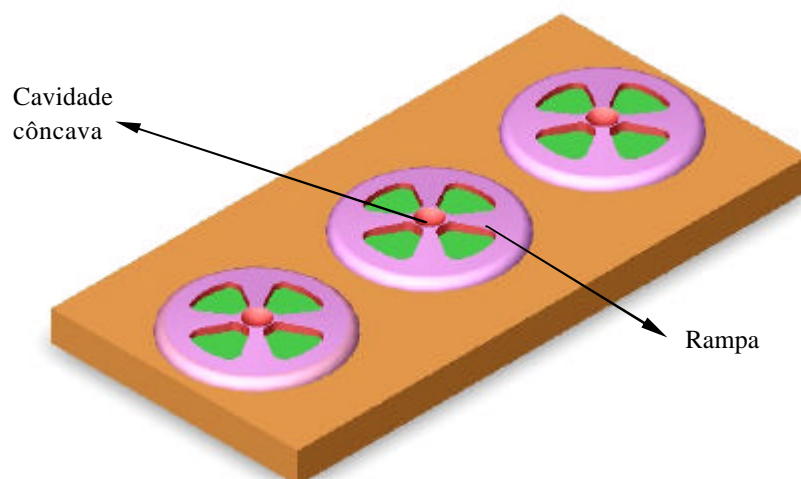


Figura 5.4 Peça 2 – Relevô com cavidades de pequena dimensão

Com base na mesma peça, foram avaliadas as estratégias e tempos de maquinagem. Foi realizada a operação “pencil” – com uma fresa de 2mm para “limpar” o fundo das cavidades. Esta operação destina-se sobretudo a eliminar excesso de material ao contorno onde não maquinam as ferramentas de maiores dimensões em acabamento.

A figura 5.5 ilustra a simulação do percurso das ferramentas utilizando o Mastercam®. Esta simulação revela-se extremamente útil por permitir detectar possíveis colisões da ferramenta com a geometria da peça.

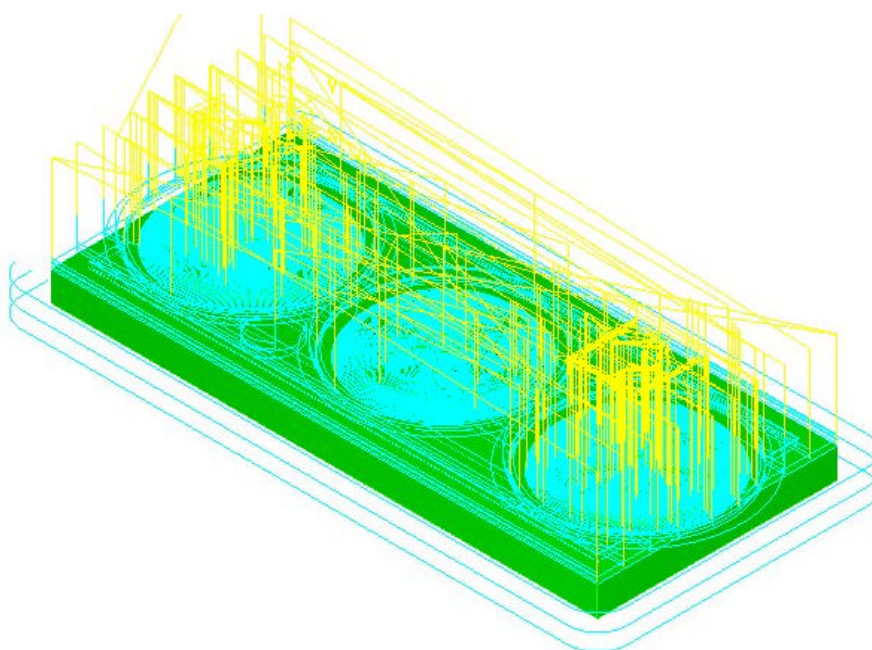


Figura 5.5 Peça 2 – Simulação do percurso das ferramentas (“toolpath”) para maquinar a peça

Na figura 5.6 é apresentada a peça 2 maquinada e respectivas estratégias utilizadas

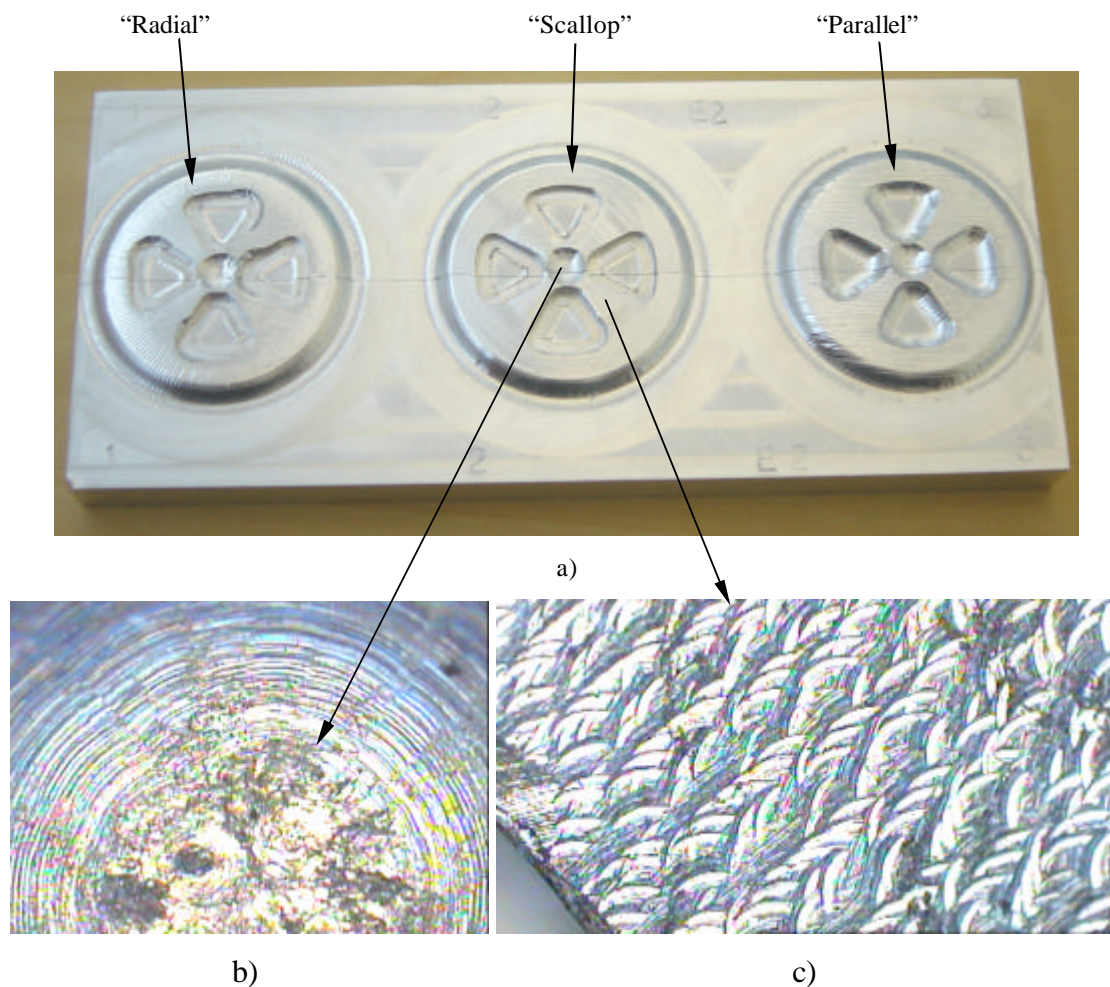


Figura 5.6 Peça 2 maquinada

a) Peça maquinada; b) pormenor da cavidade côncava; c) pormenor da rampa (M.O. 40X)

Como se trata de três geometrias semelhantes, optou-se por efectuar o acabamento das superfícies com três estratégias diferentes, conforme indicado na figura 5.6 a). Apesar dos parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço) serem os mesmos nas três estratégias, é visível uma melhor qualidade superficial na geometria central com utilização da estratégia “Scallop”.

Foi também possível observar, com utilização do microscópio óptico, o fundo da cavidade côncava e a zona da rampa. Na figura 5.6 b) é visível o efeito do encalcamento do material devido à velocidade de corte nula no centro da ferramenta. A figura 5.6 c) evidencia a topografia da superfície devida à utilização da ferramenta de topo esférico.

Para a peça 3, representada na figura 5.7, foi maquinada uma parte de um molde para tecla de computador.

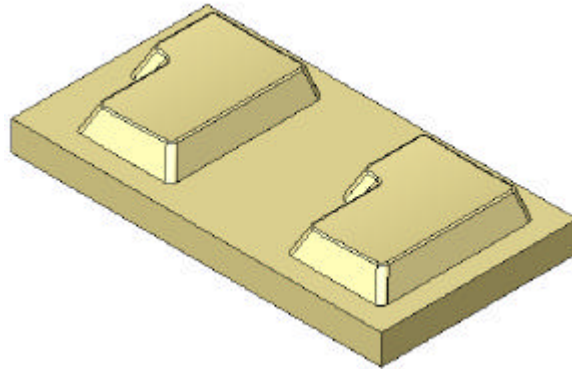


Figura 5.7 Peça 3 – Parte de um molde para tecla de computador

Com este exemplo pretendeu-se avaliar a eficácia de diferentes estratégias em superfícies inclinadas e em superfícies com raio de curvatura elevado, como é o caso da superfície superior da tecla. A estratégia “Scallop”, revelou-se também neste caso a mais eficaz. Na figura 5.8 é apresentada a simulação do percurso das ferramentas e na figura 5.9 pode observar-se a peça maquinada.

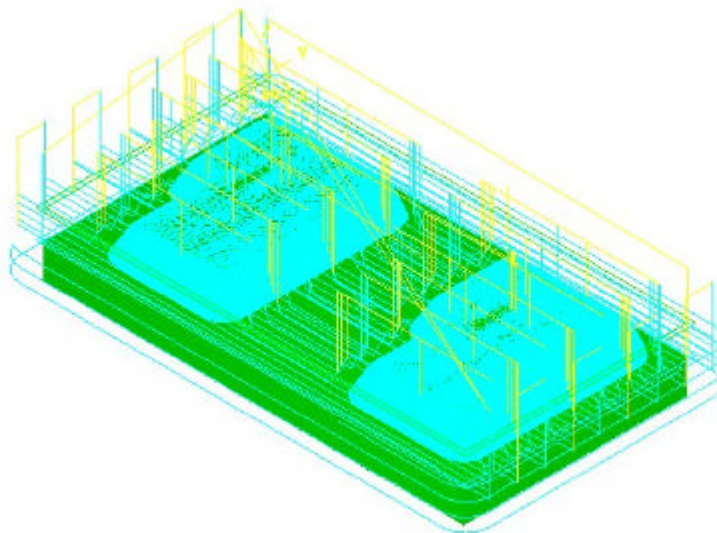
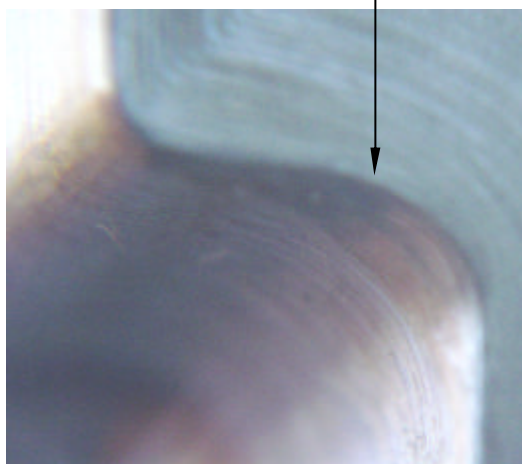


Figura 5.8 Peça 3 – Visualização dos percursos das ferramentas



a)



b)

Figura 5.9 a) peça 3 maquinada; b) pormenor de uma zona de concordância (12,5 x)

Na análise da peça maquinada foi dada especial atenção à zona destacada na figura 5.9 b), por se tratar de uma zona de concordância entre duas curvaturas com uma transição de côncava a convexa. Como se pode observar, a operação foi bem conseguida, não se visualizando interrupções na zona de transição.

Na figura 5.10 pode observar-se uma peça com geometria tridimensional de secção variável (peça 4). O objectivo foi sobretudo avaliar a estratégia mais adequada para maquinar peças com este tipo de geometria.

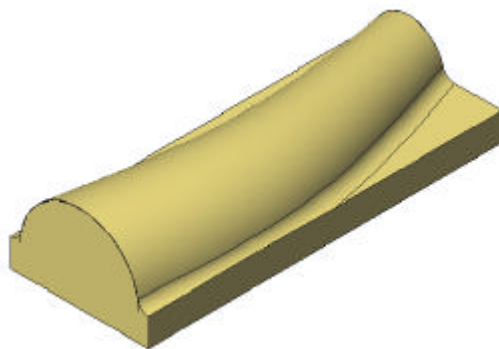


Figura 5.10 Peça 4 - Geometria tridimensional complexa

Para esta geometria, a estratégia paralela revelou-se bastante eficaz, quando orientada a 45° relativamente à maior dimensão da peça. Na figura 5.11 é ilustrada a simulação do percurso da ferramenta na operação de acabamento.

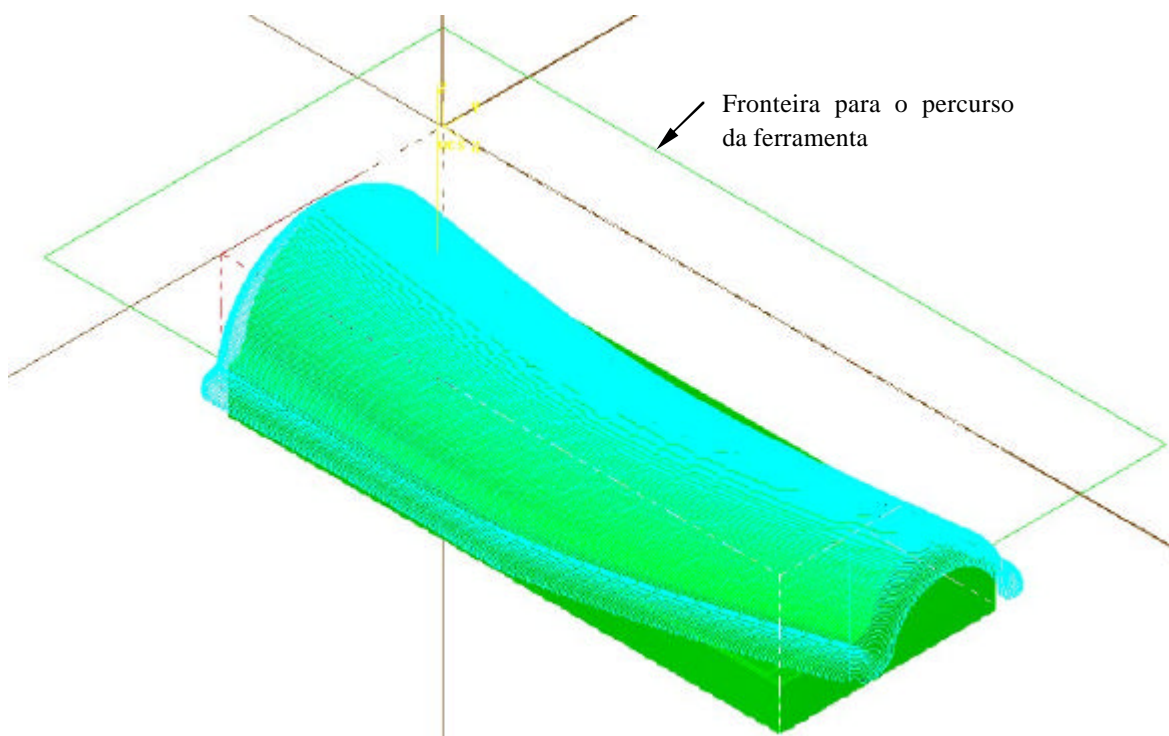
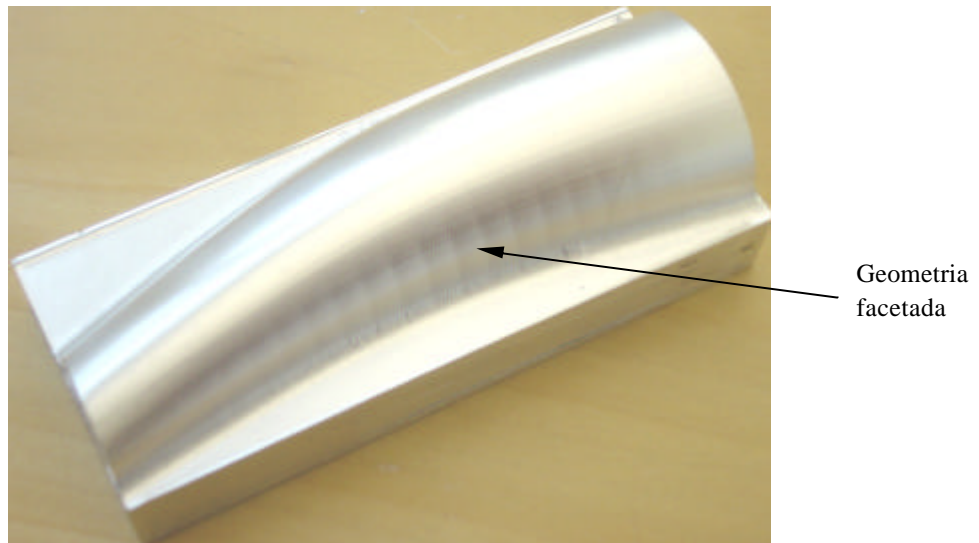


Figura 5.11 Peça 4 – Visualização da trajectória da ferramenta na operação de acabamento

É também importante a definição de um contorno envolvente ao bloco a maquinar, dentro do qual se movimenta a ferramenta. Desta forma reduzem-se os tempos mortos porque são evitados os percursos exagerados em vazio, na entrada e saída da ferramenta na peça. Foram maquinadas duas peças com esta geometria. Na primeira, foi possível observar um aspecto facetado como mostra a figura 5.12 a).



a)



b)

Figura 5.12 Peça 4 maquinada

- a) Estratégia paralela a 45° relativamente ao eixo principal da peça, com uma tolerância de 0,025 mm
- b) a mesma estratégia com a utilização de uma tolerância de 0,005 mm

Este efeito foi substancialmente reduzido quando se alterou o valor da tolerância de 0,025 para 0,005mm. A figura 5.12 b) torna evidentes as diferenças, relativamente à primeira peça maquinada (figura 5.12 a).

A qualidade superficial também melhorou. No primeiro caso o valor da rugosidade média aritmética – R_a , foi de 0,793 μm , enquanto que na segunda situação passou para 0,573 μm , ou seja, uma redução de 27,7 %.

A tolerância referida, diz respeito à limitação do campo em que se movimenta a ferramenta ou tolerância do sistema CAM. A título de exemplo, é ilustrado na figura 5.13 um contorno a maquinar.

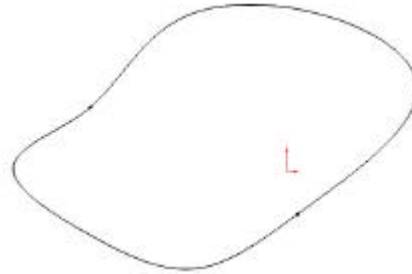


Figura 5.13 Contorno a maquinar

Na figura 5.14 está representada a tolerância do contorno e o percurso da ferramenta nos limites dessa tolerância.

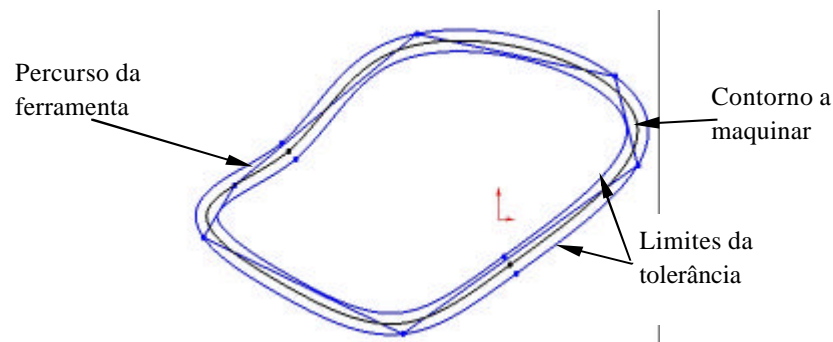


Figura 5.14 Definição da tolerância no percurso da ferramenta

Para o mesmo contorno, são apresentadas na figura 5.15 as trajetórias simuladas da ferramenta, para uma tolerância de 0,025 mm e 0,005 mm

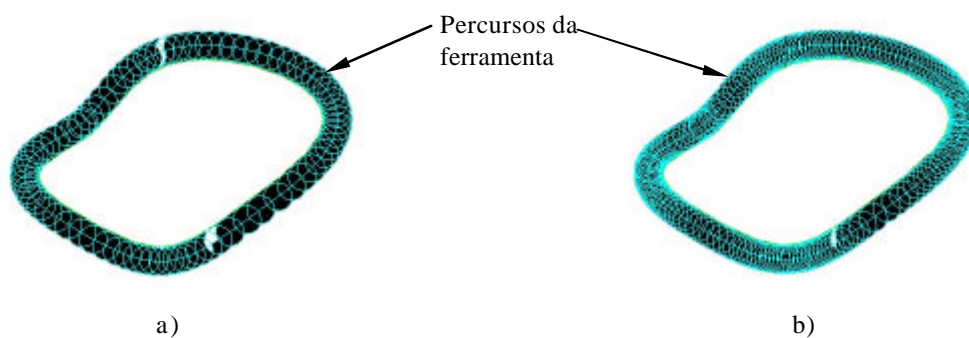


Figura 5.15 Simulação das trajetórias da ferramenta para dois valores de tolerância : a) 0,025mm; b) 0,005 mm

Como se pode observar na figura 5.15, a redução da tolerância no percurso da ferramenta, gera movimentos rectilíneos mais curtos, o que origina um maior número de blocos de programa.

Para o exemplo da figura 5.15 foi feito o pós-processamento do programa gerado para cada um dos valores de tolerância. Comparando os programas foi possível observar os resultados que constam da tabela 5.1.

Tabela 5.1 Comparação dos programas gerados para os valores de tolerância considerados

Tolerâncias [mm]	Nº de blocos de programa	Tamanho do programa pós processado [kb]	Tempo para execução do contorno
0,0025	140	3	1' 15"
0,005	235	5	1' 15"
Variação	+ 68%	+ 67%	–

Este exemplo mostra que apesar do aumento do número de blocos e do espaço em disco para uma tolerância menor, o tempo para execução do contorno se manteve.

Reside aqui a importância da função “*look-ahead*” e do *tempo de processamento de bloco*. Para outras geometrias como a representada na figura 5.12, as variações do número de blocos e do espaço em disco são maiores. Contudo, a peça da figura 5.12 b), demorou apenas mais cinco minutos a maquinar que a da figura 5.12 a), apesar da redução do valor da tolerância. A redução de 27,7% no valor de Ra compensa o aumento do tempo de execução

A realização de ensaios preliminares permitiu verificar a importância da utilização de geometrias padrão, para estabelecer comparações entre a maquinagem convencional e a maquinagem com alta velocidade.

Tendo por base este princípio, surgiu a peça 5 apresentada na figura 5.16 – peça padrão, que permite analisar diferentes geometrias com a mesma peça.

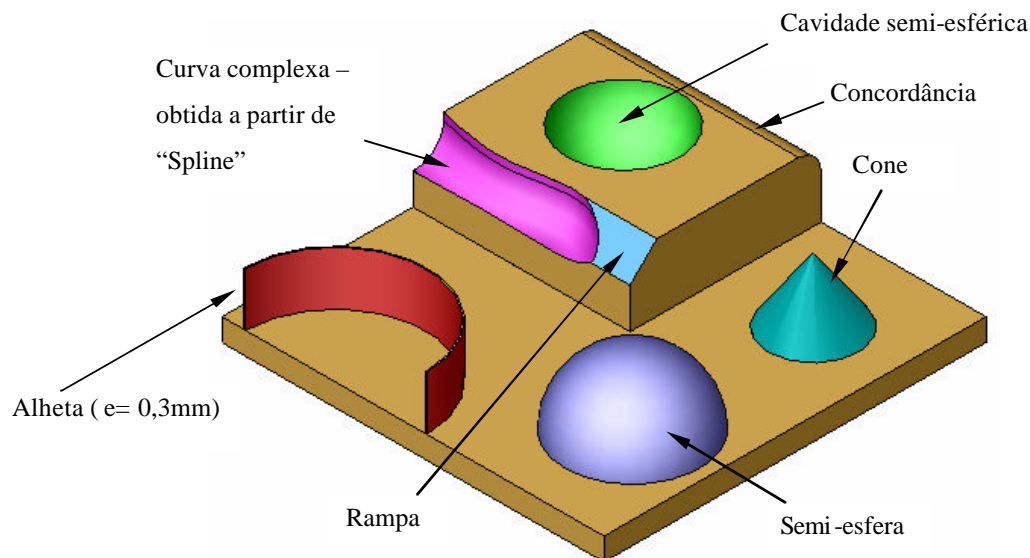


Figura 5.16 Peça 5 – peça padrão

Esta solução conduziu a sete situações distintas, cada uma com as suas particularidades que passam a descrever-se:

- **Cavidade semi-esférica** – é um problema de acabamento na profundidade máxima, à semelhança do que foi observado na peça 1. Na operação de acabamento, a utilização de uma fresa de topo esférico é favorável, por se tratar de uma superfície côncava.
- **Concordância** – é uma situação que pode ser complicada, caso não se utilizem incrementos laterais (avanço radial) adequados. a superfície poderá ficar com um aspecto estriado e notando-se um vinco nos limites da concordância.
- **Cone** – é uma superfície de revolução que permite avaliar o rigor dimensional em termos de altura e observar o efeito de facetamento. Este efeito terá que ser controlado com o factor de toleranciamento durante a programação.
- **Semi-esfera** – é também uma superfície de revolução com o problema de facetamento. Existe ainda outra particularidade que é o facto de o diâmetro de corte da ferramenta variar desde zero, na cota máxima da esfera, até um valor próximo do seu diâmetro na parte inferior. Na figura 5.17 está representado o diâmetro de corte efectivo, D_c , para uma posição do ponto de tangência da ferramenta com a semi-esfera correspondente ao ângulo de posição θ em relação ao plano da base da esfera.

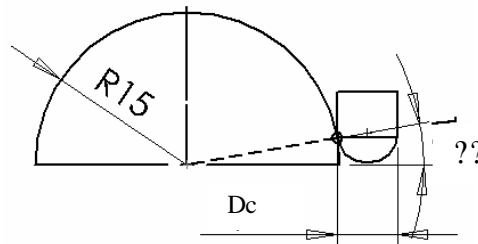


Figura 5.17 Variação do diâmetro efectivo de corte em função do ângulo θ

No gráfico da figura 5.18 é apresentada a variação de D_c para uma ferramenta de topo esférico com 6 mm de diâmetro, para o ângulo θ compreendido entre 10 e 85°.

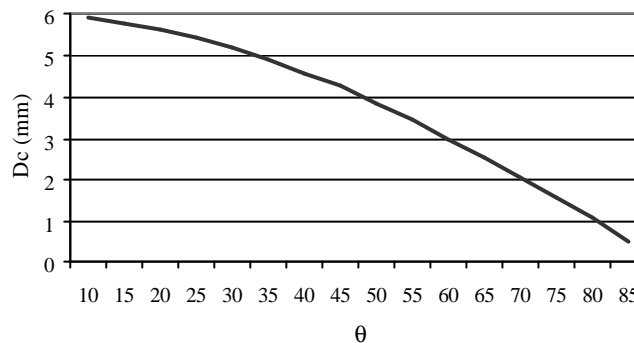


Figura 5.18 Variação de D_c , em função do ângulo θ

O valor mínimo de 10° corresponde à posição da ferramenta em que o seu topo toca o plano da base da esfera.

- **Rampa** – é uma geometria onde o factor mais importante é o valor do avanço radial entre passagens “Stepover”. A estratégia paralela é a mais indicada. No entanto a maquinagem pode ser realizada no sentido vertical ou horizontal.
- **Alheta** – é uma geometria, embora se revista de grande interesse, dado que a sua maquinagem obriga a que o desbaste e acabamento sejam realizados em patamares incrementais. Evita-se desta forma a flexão da parede, como aconteceria se o acabamento fosse realizado apenas depois da operação de desbaste estar concluída. Como a operação de desbaste foi realizada com a rotação standard da máquina, esta geometria foi também maquinada com esta rotação. Daí que não se estabeleça uma comparação das duas situações.
- **Curva complexa** – é uma geometria modelada a partir de uma “Spline”. O seu interesse reside no facto de o raio de curvatura mudar constantemente, o que

dificulta a precisão de movimentos da ferramenta. Qualquer instabilidade na ferramenta irá aumentar esse problema. O incremento radial e a tolerância de maquinagem seleccionada são os principais factores a controlar neste caso.

A figura 5.19 mostra uma fase da simulação da operação de desbaste enquanto a alheta é simultaneamente acabada.

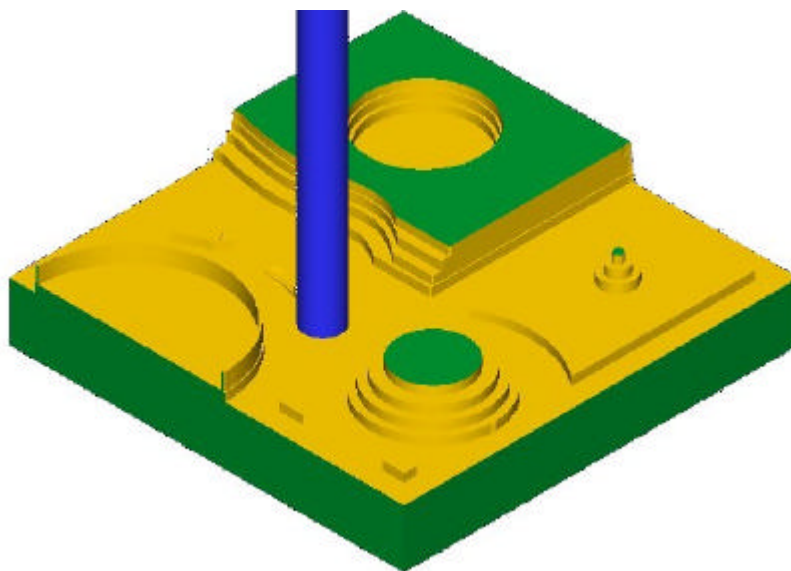


Figura 5.19 Simulação da operação de desbaste

Na figura 5.19 é visível a sobre-espessura na alheta para a realização da passagem de acabamento. Pode também observar-se a irregularidade das zonas maquinadas. A operação intermédia entre o desbaste e o acabamento é o “Restmill”. Na figura 5.20 é apresentada uma fase da simulação desta operação.

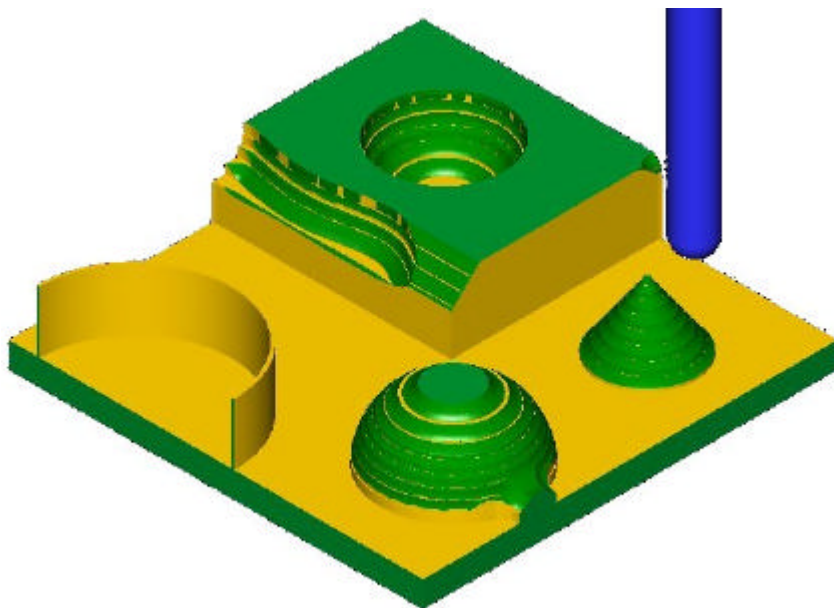


Figura 5.20 Simulação da operação “Restmill”

A operação “Restmill” tem como função a regularização da sobre-espessura do material de forma a otimizar a operação de acabamento.

Na figura 5.21 é apresentada a peça padrão depôs de concluída a operação “Restmill”



Figura 5.21 Peça padrão após a operação “Restmill”

Como pode ser observado, a alheta já se encontra maquinada no final desta operação.

Na figura 5.22 pode observar-se a peça padrão já concluída.

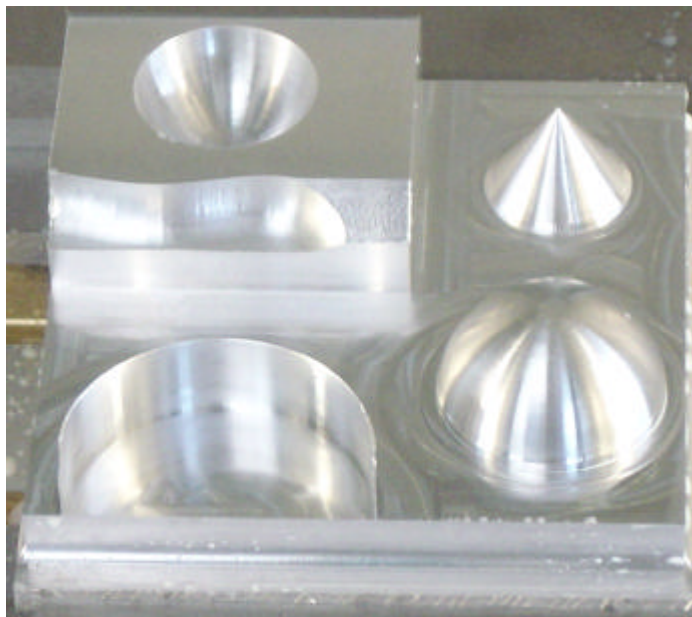


Figura 5.22 Peça padrão concluída

Com base na peça padrão foram realizados diversos ensaios tendo em vista avaliar o desempenho da turbina de alta rotação.

6 RESULTADOS OBTIDOS E SUA DISCUSSÃO

6.1 Introdução

Os ensaios de maquinagem realizados em fresagem da liga de alumínio (liga 7050-T7451, segundo a classificação ASM - *Aerospace Specification Metals, Inc.*), permitiram avaliar entre outros aspectos, o acabamento das superfícies (usando o rugosímetro de agulha Hommelwerke® -T 1000) e a precisão dimensional (com recurso à máquina de medição por coordenadas Mitutoyo® – B715). Foi efectuada uma comparação entre os valores obtidos em operações de acabamento, utilizando a turbina pneumática de alta rotação (da marca Air Turbine Tools®, modelo FJX 230) e a cabeça “standard” do centro de maquinagem vertical usado nos ensaios (Cincinnati®, modelo Arrow 750). Utilizaram-se ferramentas integrais de metal duro com as características apresentadas na secção 4.3. Foram usadas ferramentas de topo raso no acabamento das superfícies planas e de topo esférico no acabamento das superfícies complexas.

Foi também possível observar o efeito da utilização da técnica da lubrificação mínima (MQL – *Minimal Quantities of Lubricant*) no acabamento das superfícies maquinadas. Estes ensaios permitiram também verificar alguns dos requisitos que devem possuir as máquinas-ferramenta que utilizem sistemas de lubrificação mínima.

Os ensaios realizados foram desenvolvidos em três fases.

- ? Na *primeira fase*, foram realizados ensaios preliminares, com fresas de topo raso em provetes planos, com o objectivo de otimizar os parâmetros de corte (velocidade e avanço), e o efeito da lubrificação mínima em duas situações distintas de fresagem – concordante ou discordante (oposição).
- ? Na *segunda fase*, foram realizados ensaios na peça padrão, apresentada no capítulo 5, com o objectivo de otimizar as estratégias de maquinagem mais adequadas às formas que compõem a referida peça.
- ? Na *terceira fase*, foram realizados ensaios na peça padrão com as estratégias anteriormente seleccionadas, para avaliar o acabamento das superfícies e a precisão dimensional em função dos parâmetros de corte utilizados (velocidade e avanço).

6.2 Otimização dos parâmetros de corte com ferramenta de topo raso em provetes planos

Os ensaios consistiram na maquinagem de diversas pistas em peças planas, ilustradas na figura 6.1.



Figura 6.1 Exemplo de provete plano para otimização da velocidade de avanço

Foram maquinados provetes com a turbina pneumática de 40.000 rpm e com a árvore “standard” da máquina, a 9.000 rpm. Nas duas situações foi usada uma fresa integral de metal duro, topo raso, com 6 mm de diâmetro, e uma profundidade de corte axial p , de 0,2 mm.

As velocidades de corte utilizadas foram de 750 m/min para a turbina pneumática e de 170 m/min para a árvore “standard” da máquina, respectivamente.

Em cada uma das quatro faces de cada peça, foram analisadas 8 pistas, correspondendo a cada pista os seguintes avanços: **600; 1200; 2000; 2800; 3600; 4400; 5200; 6000** (mm/min.)

Os restantes parâmetros de maquinagem encontram-se referidas na tabela 6.1.

Tabela 6.1 Parâmetros de maquinagem usados nas diferentes faces dos provetes

Parâmetros de maquinagem	Provetes 1; $V_c = 750$ m/min				Provetes 2; $V_c = 170$ m/min			
	Face 1	Face 2	Face 3	Face 4	Face 1	Face 2	Face 3	Face 4
Lubrificação mínima			X	X			X	X
Lubrificação abundante	X	X			X	X		
Em concordância		X		X		X		X
Em oposição	X		X		X		X	

Os parâmetros de rugosidade medidos nas diferentes pistas foram os seguintes:

- ? Ra - rugosidade média aritmética, (DIN 4768) – média dos valores de rugosidade no comprimento de referência.
- ? Rt – altura entre o pico mais elevado e o vale mais profundo do perfil, no comprimento de medida (DIN 4762).

Os valores de Ra e Rt obtidos resultaram da média de duas medições.

Na figura 6.2 é analisado o **efeito da velocidade de corte** sobre a rugosidade média aritmética (Ra) em função dos parâmetros de corte ensaiados (velocidade de corte e de avanço, lubrificação e método de fresagem).

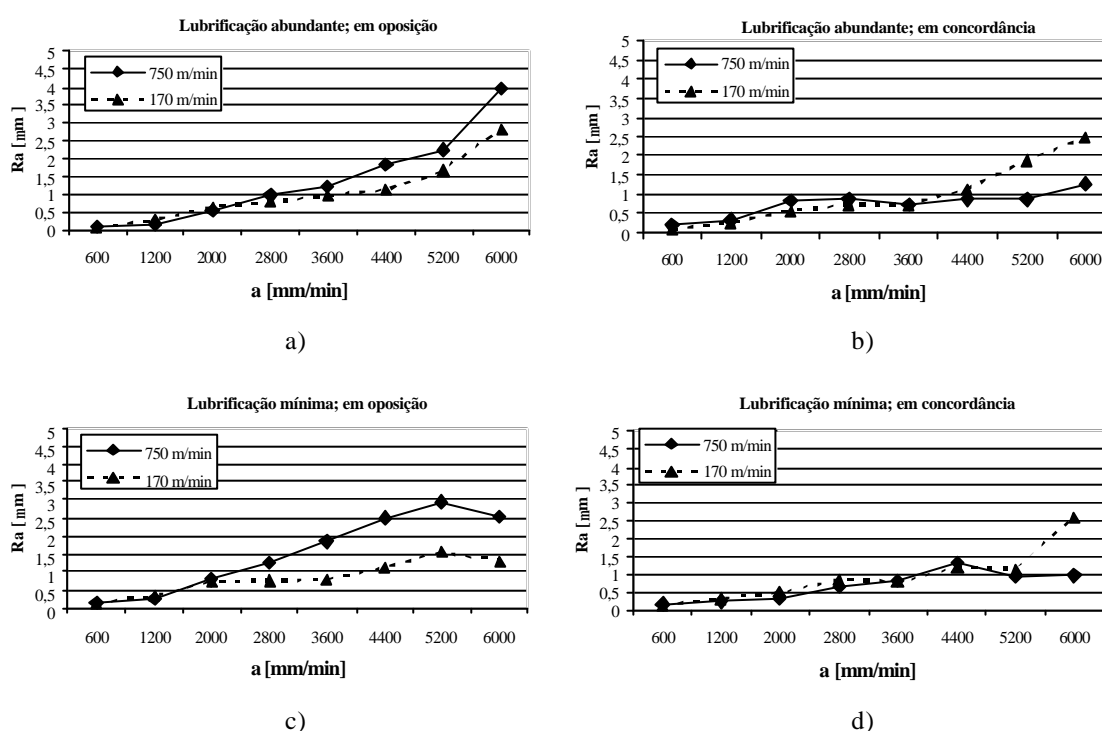


Figura 6.2 Valores de Ra em função do avanço, para as velocidades de corte utilizadas

Na figura 6.2 pode observar-se uma semelhança de resultados na gama de avanços compreendida entre os 600 e os 2800 mm/min para a **fresagem em oposição** (figura 6 a) e c)). Com avanços mais elevados, os valores de Ra são inferiores para a velocidade de corte mais baixa (170 m/min). Na fresagem **em concordância** (figura 6.2 b) e d)), os valores de Ra obtidos são semelhantes para valores de avanço até 4400 mm/min. Para avanços mais elevados os valores de Ra foram inferiores quando se utilizou a turbina de alta rotação (750 m/min).

Estes resultados mostram que para velocidades de corte e de avanço elevadas, deve optar-se por estratégias que possibilitem o corte em concordância.

Na figura 6.3 é analisada a **influência do método de fresagem** (em concordância e em oposição) nos valores de Ra .

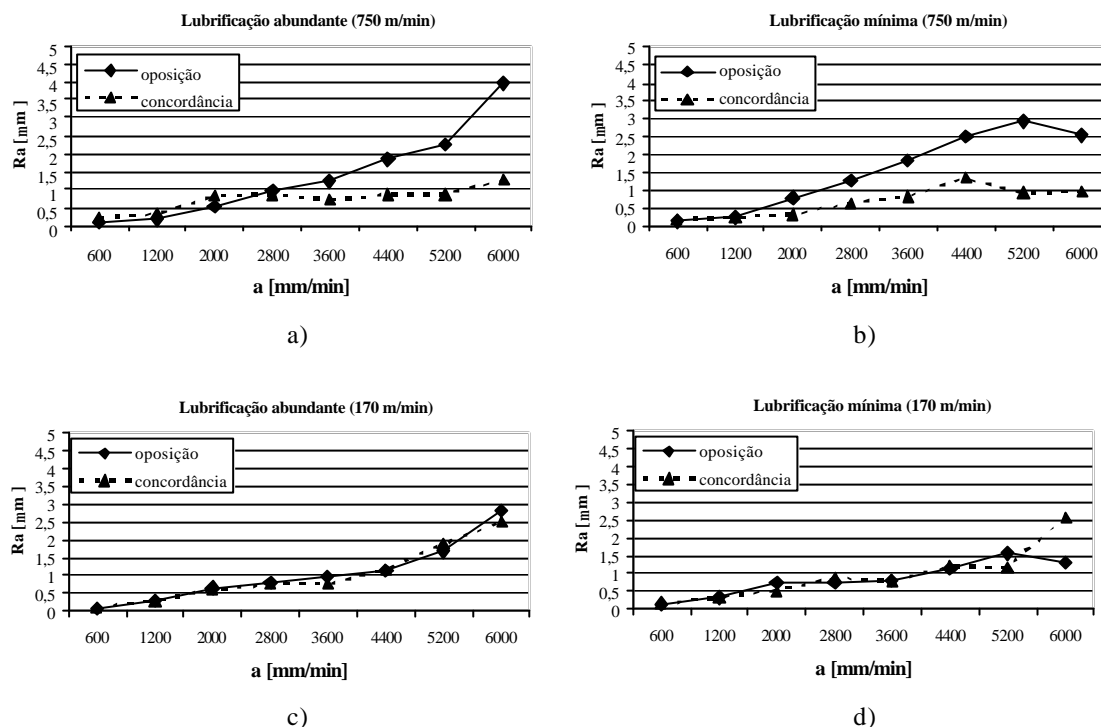


Figura 6.3 Valores de Ra em função do avanço, para a fresagem em concordância e em oposição

Como pode ser observado na figura 6.3 a) e b), a fresagem em concordância é mais favorável para velocidades de corte e de avanço mais elevadas. Para a velocidade de corte de 170 m/min há uma grande semelhança dos valores de Ra em toda a gama de avanços utilizada como se pode observar na figura 6 c) e d). Esta verificação, reforça a vantagem de adoptar a fresagem em concordância, em especial quando se utilizam ferramentas de metal duro.

A figura 6.4 ilustra os dois métodos de fresagem considerados.

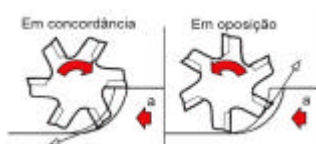


Figura 6.4 Fresagem em concordância e em oposição¹

¹ Sandvik Coromant – Fabricação de moldes e matrizes – Guia de aplicação

Na fresagem em concordância os esforços predominantes sobre a aresta de corte são esforços de compressão, situação que é favorável à resistência mecânica do metal duro. Com este método, quando a aresta de corte entra em contacto com a peça, a espessura da apara tem o seu valor máximo. Na fresagem em oposição (ou discordante), a espessura da apara é mínima no momento do contacto da ferramenta com a peça. Neste tipo de fresagem há uma grande geração de calor devida ao atrito inicial da aresta de corte com o material, até que se inicie a formação da apara. Esta situação é desfavorável para a ferramenta porque reduz a sua vida útil e para o processo de corte, em especial na maquinagem de materiais dúcteis, porque favorece o fenómeno da apara aderente.¹

Na figura 6.5 é analisada a influência do **método de lubrificação** sobre o valor de Ra para os diferentes parâmetros de corte (avanço e velocidade de corte).

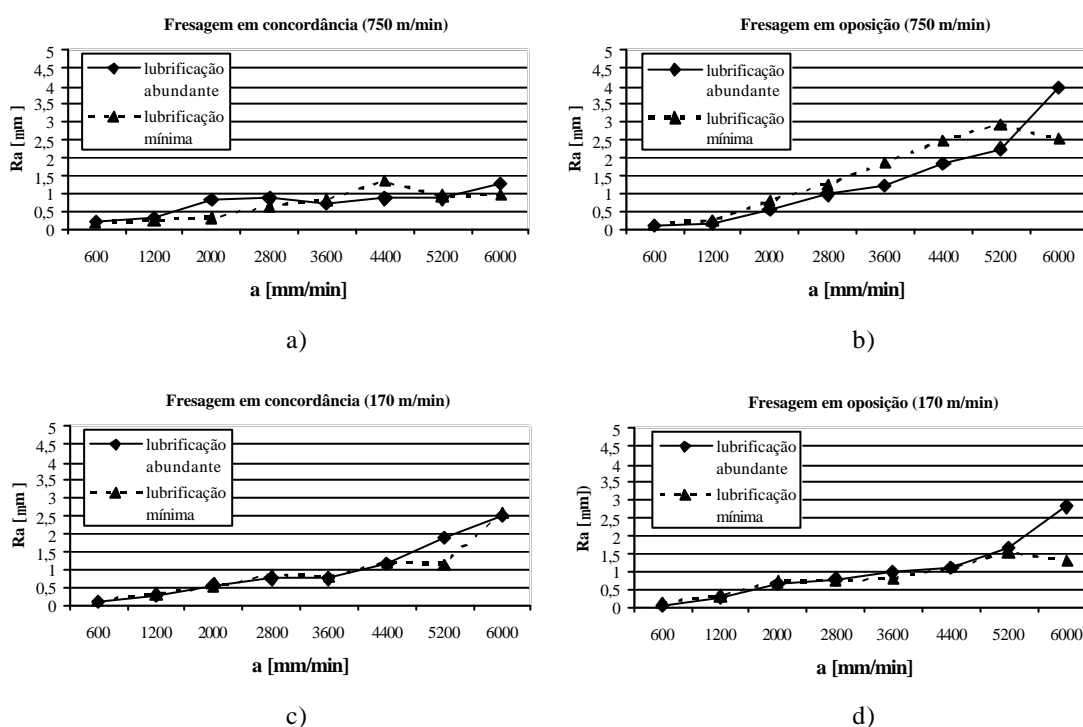


Figura 6.5 Valores de Ra em função do avanço, com lubrificação mínima e abundante

Como pode ser observado na figura 6.5, os valores de Ra são semelhantes para toda a gama de avanços e velocidades de corte ensaiadas. Pode concluir-se que a lubrificação com

¹ Sandvik Coromant – Fabricação de moldes e matrizes – Guia de aplicação

mínima quantidade de lubrificante (MQL) é uma alternativa viável, relativamente à lubrificação abundante.

Outro parâmetro analisado foi o valor da amplitude máxima de rugosidade (R_t). Este parâmetro permite avaliar a existência de picos anormais de rugosidade no comprimento de medida, ou seja, a existência de irregularidades no perfil de rugosidade.

Na figura 6.6 são apresentados os valores de R_t em função do avanço, para os parâmetros de corte ensaiados (velocidade de corte e de avanço, lubrificação e método de fresagem).

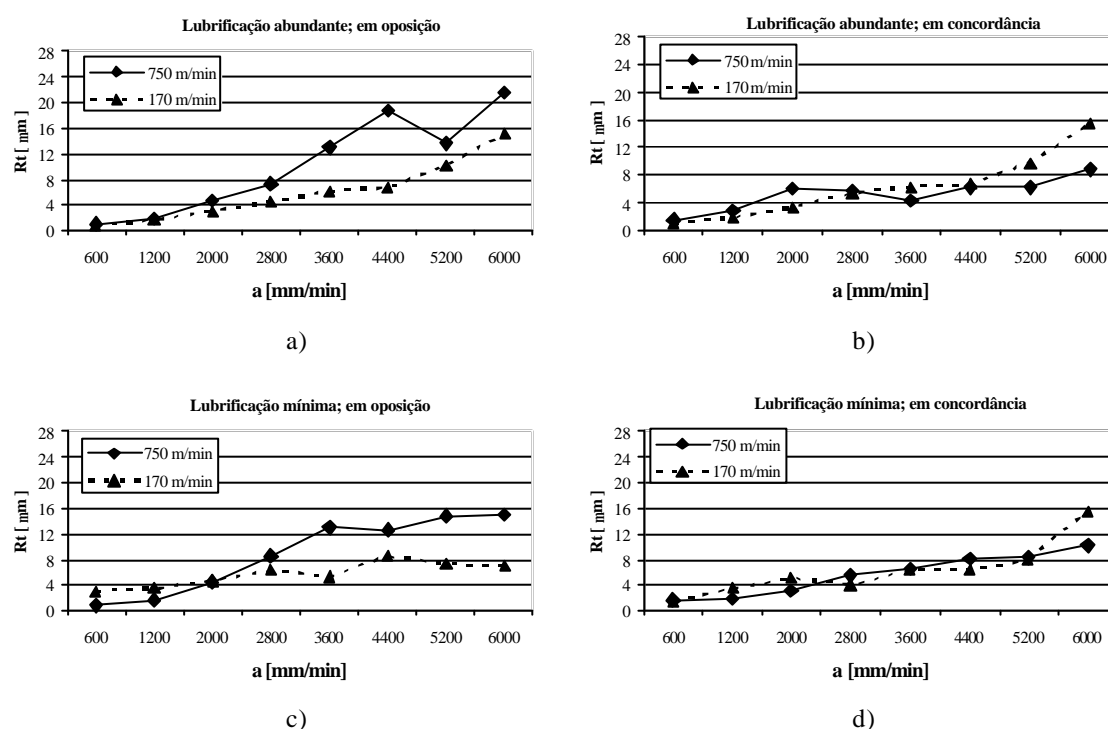


Figura 6.6 Valores de R_t em função do avanço, para as condições de corte ensaiadas

A figura 6.6 mostra que os valores mais elevados de R_t ocorreram para a fresagem em oposição, quando se utilizou a turbina de alta rotação, à semelhança do que se verificou com os valores de R_a . Estes resultados poderão ter origem na maior instabilidade da turbina de alta rotação motivada por forças radiais mais elevadas, que se verificam no corte em oposição e pela menor rigidez do conjunto turbina/ferramenta, comparativamente à montagem da ferramenta directamente na árvore da máquina. Os resultados obtidos vão de encontro ao que foi referido na secção 2.7.3, relativamente a possíveis problemas resultantes da montagem da turbina de alta rotação.

Daqui se conclui que na selecção das estratégias para a utilização deste tipo de turbinas é prioritário optar pelo corte em concordância.

Para complementar esta análise foram realizadas observações da topografia das superfícies ao microscópio óptico. Na figura 6.7 são apresentadas imagens correspondentes a três valores de avanço para cada uma das velocidades utilizadas nos ensaios. Os avanços seleccionados são os que correspondem à gama em que se verifica uma maior proximidade dos valores de Ra medidos. As imagens correspondem à situação de fresagem em concordância, com lubrificação abundante.

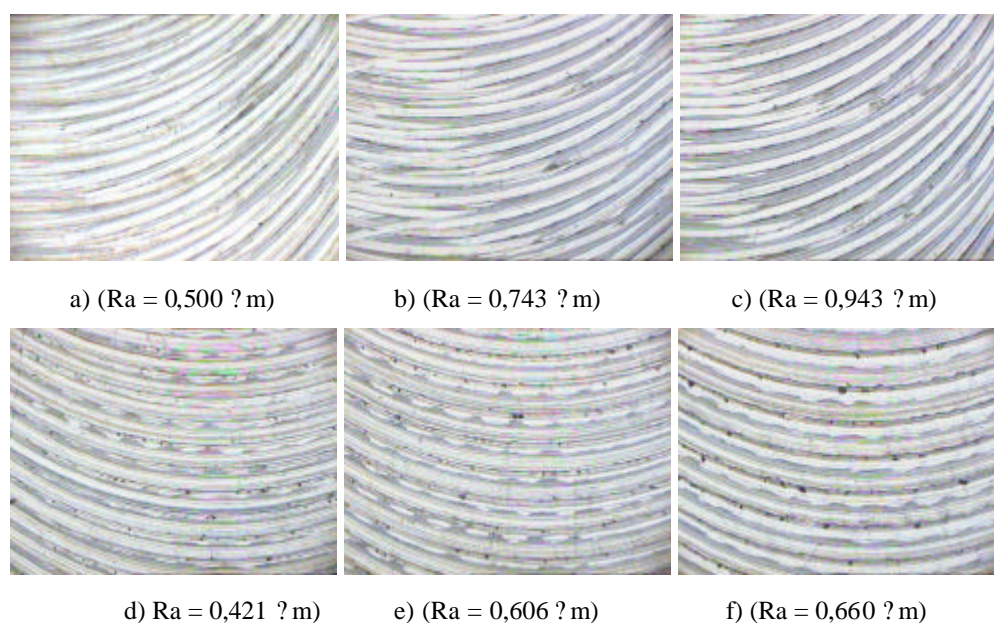


Figura 6.7 Topografia das pistas maquinadas para $V_c = 750$ m/min (a, b, c) e para $V_c = 170$ m/min (d, e, f). Avanços: a, d – 1600 mm/min; b, e – 2000 mm/min; c, f – 2400 mm/min. (M.O. 20X)

Na figura 6.7 a), b) e c), pode verificar-se que a textura superficial se apresenta mais uniforme com a turbina de alta rotação. As superfícies obtidas com a rotação “standard” da máquina revelam a existência de “cristas” resultantes de um avanço por dente mais elevado. Nestas imagens é evidente a influência da velocidade de rotação. O maior avanço por dente para a rotação “standard” da máquina conduz a um efeito complementar de **aplainamento**, associado ao movimento de corte. Como o material maquinado possui boa ductilidade e a profundidade de corte é reduzida (0,2 mm), este efeito não se traduz num

aumento dos valores de Ra para a gama de avanços média e baixa. O mesmo não se passa para os valores mais elevados de avanço.

A análise dos parâmetros de rugosidade (Ra , Rt entre outros), como forma de comparar as superfícies maquinadas, pode conduzir a interpretações pouco rigorosas. Pode acontecer por exemplo que duas micro geometrias com o mesmo valor de Ra possuam características de robustez diferentes. Uma análise mais completa engloba parâmetros estatísticos, entre os quais se destacam os seguintes:

? “**Skewness**” – **Rsk** (DIN EN ISO 4287)

O valor de Rsk traduz a medida da simetria da amplitude da curva densidade de probabilidade. A figura 6.8 ilustra o significado do valor deste parâmetro

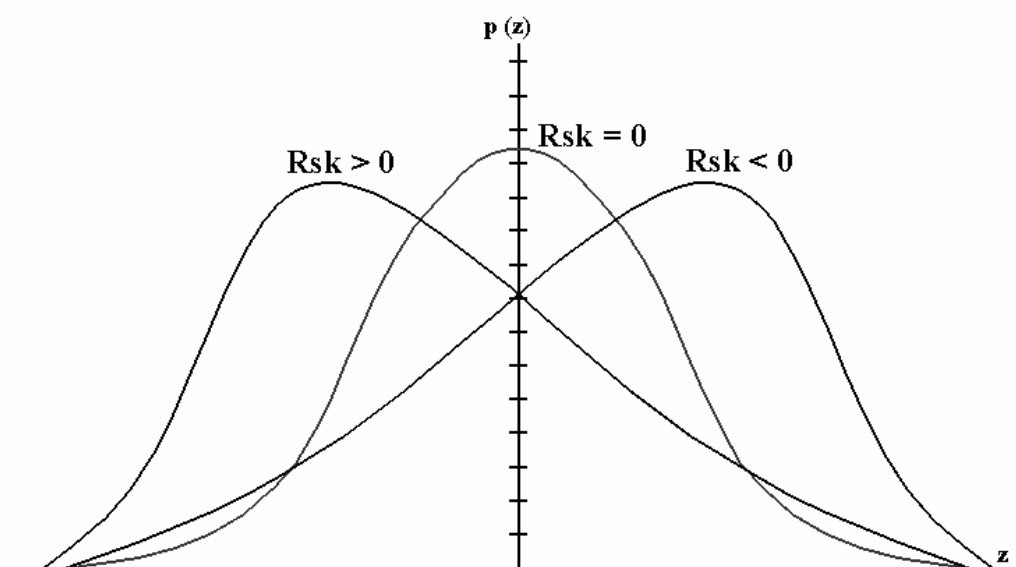


Figura 6.8 Altura da curva da função densidade de probabilidade segundo o valor de Rsk (Skewness)
(Davim, 1995)

Se o valor de $Rsk = 0$, o perfil é simétrico; se $Rsk < 0$, o perfil é muito robusto; se $Rsk > 0$, o perfil é pouco robusto (Davim, 1995).

? “**Kurtosis**” – **Rku** (DIN EN ISO 4287)

O valor de Rku , caracteriza a dispersão das ordenadas do perfil de rugosidade, conforme ilustrado na figura 6.9.

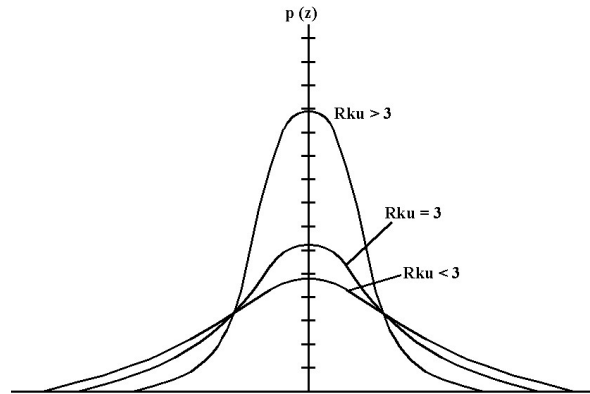


Figura 6.9 Indicação da altura da curva da função densidade de probabilidade segundo o valor de Rku (Kurtosis) (Davim, 1995)

Se $Rku > 3$ o número de picos e vales elevados é maior; se $Rku = 3$ o perfil é homogêneo e tem uma distribuição normal; se $Rku < 3$ não há picos e vales de valor elevado.

? Curva da área de suporte (Curva de Abbot)

A curva de “Abbot” é definida pela variação, em função da altura $Z(x)$, da relação entre a superfície do material existente nessa altura e a superfície total. A figura 6.10 ilustra este conceito.

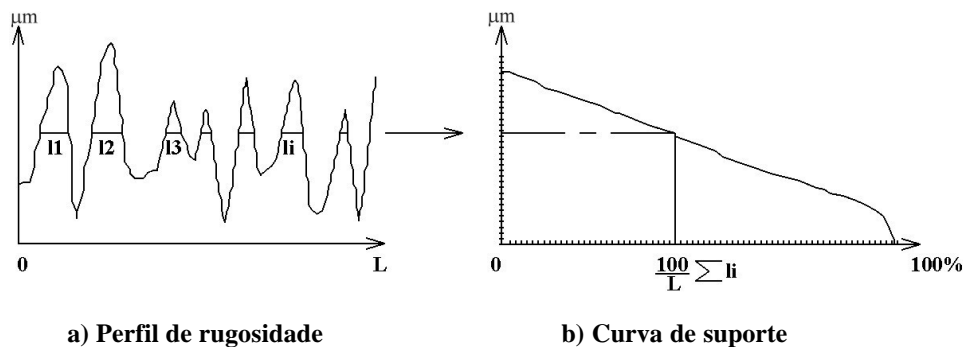


Figura 6.10 Esquema de um perfil de rugosidade e respectiva curva da área de suporte (Abbot) (Davim, 1995)

A análise da figura 6.10 permite verificar que quanto maior for a planeza da curva de suporte, menor será o valor dos picos e vales e mais robusto será o perfil. Quando se procede à medição da rugosidade, define-se uma percentagem do comprimento do perfil e obtém-se o valor da rugosidade correspondente. Esse valor é referido por **Rmr** (..) (Roughness profile material ratio) (DIN EN ISO 4287).

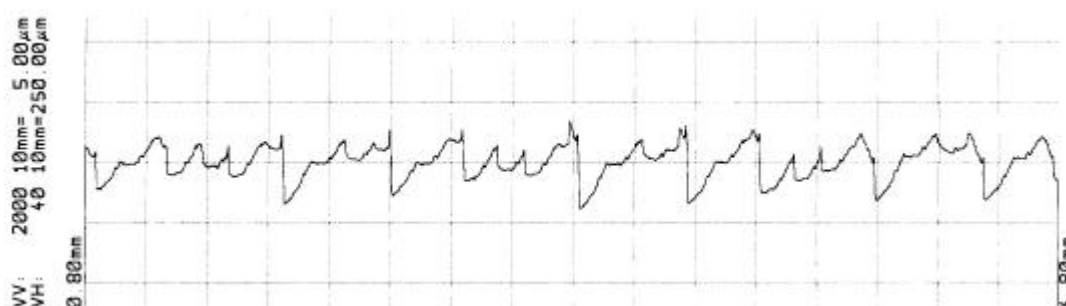
Com base nos três critérios referidos anteriormente estabeleceu-se uma comparação das superfícies obtidas com a turbina de alta rotação e com a cabeça “standard”, para um avanço de 6000 mm/min e fresagem em concordância. Na tabela 6.2 são apresentados os valores dos parâmetros obtidos. Para *Rmr* seleccionou-se o valor 50%.

Tabela 6.2 Parâmetros de rugosidade obtidos com a turbina de alta rotação e com a cabeça “standard” para um avanço de 6000 mm/min

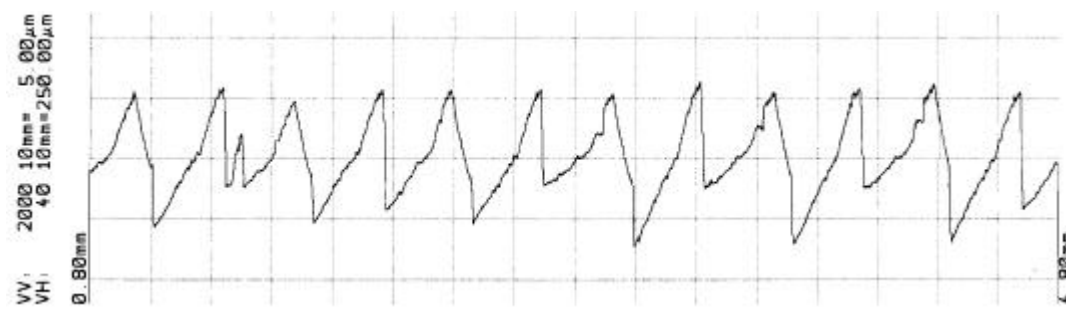
	Ra [μ m]	Rt [μ m]	Rsk (Skewness)	Rku (Kurtosis)	Rmr (50%) [μ m]
S40.000F6.000	1,114	7,28	-0,479	2,767	3,24
S9.000F6.000	2,503	13,6	0,062	2,341	6,63

Pela análise dos valores da tabela 6.2 verifica-se que para valores de avanço elevados, o factor rotação é determinante na qualidade das superfícies obtidas. Com a turbina de alta rotação, além do valor de *Ra* mais baixo, os valores dos parâmetros *Rsk* (< 0), *Rku* (< 3) e *Rmr* (50%) (3,24 μ m), permitem prever um perfil mais regular e robusto do que o obtido a baixa rotação.

Na figura 6.11 é possível comparar dois perfis de rugosidade obtidos.



a) ($Ra = 1,114 \mu$ m)



b) ($Ra = 2,503 \mu$ m)

Figura 6.11 Perfis de rugosidade para a fresagem em concordância; a) S40.000 F6.000; b) S9.000F6.000

Apesar das diferenças entre os dois perfis, é de realçar o facto de o valor de Rku para baixa rotação ser menor que 3. Tal facto significa apenas que não há picos e vales de valor elevado dentro do perfil em análise, como se pode observar na figura 6.11 b).

Na figura 6.12 são apresentadas as curvas de suporte correspondentes aos dois perfis de rugosidade representados na figura 6.9.

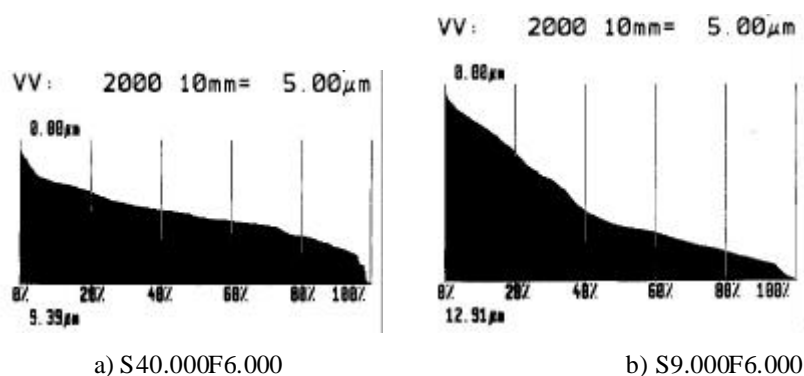


Figura 6.12 Curvas de *Abbot* obtidas para alta (a) e baixa rotação (b) na fresagem em concordância

Na figura 6.12 pode ser observada a correspondência da geometria da *curva de Abbot* e do perfil de rugosidade obtido. A maior robustez do perfil de rugosidade para alta rotação, corresponde a uma *curva de Abbot* mais plana e por isso mais robusta.

Esta análise permite verificar a complementaridade dos diferentes parâmetros de rugosidade e a sua importância na avaliação da qualidade das superfícies maquinadas.

6.3 Optimização das estratégias na peça padrão

A primeira fase dos ensaios na peça padrão foi dedicada à afinação das melhores estratégias para as geometrias que compõem a peça.

Foram maquinadas algumas peças com o objectivo de afinar alguns parâmetros e a melhor sequência de operações para evitar colisões da ferramenta com a peça. Para este efeito foi utilizada a velocidade de corte (V_c) de 170 m/min e um avanço de 1200 mm/min nas operações de acabamento.

Na figura 6.13 é apresentada a peça padrão com as respectivas geometrias.

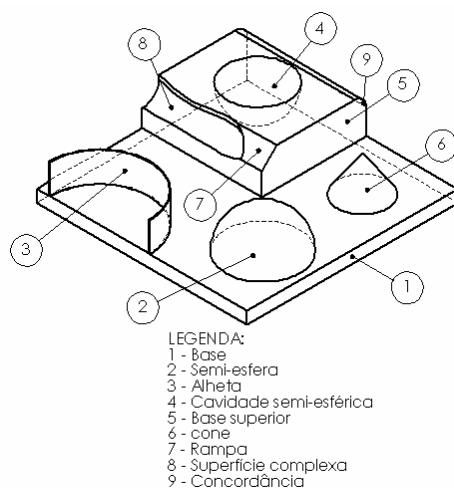


Figura 6.13 Peça padrão e geometrias constituintes

Na figura 6.14 pode observar-se a primeira peça maquinada e os principais problemas detectados. Nesta fase, o controlo das peças foi realizado por inspecção visual e registo fotográfico.

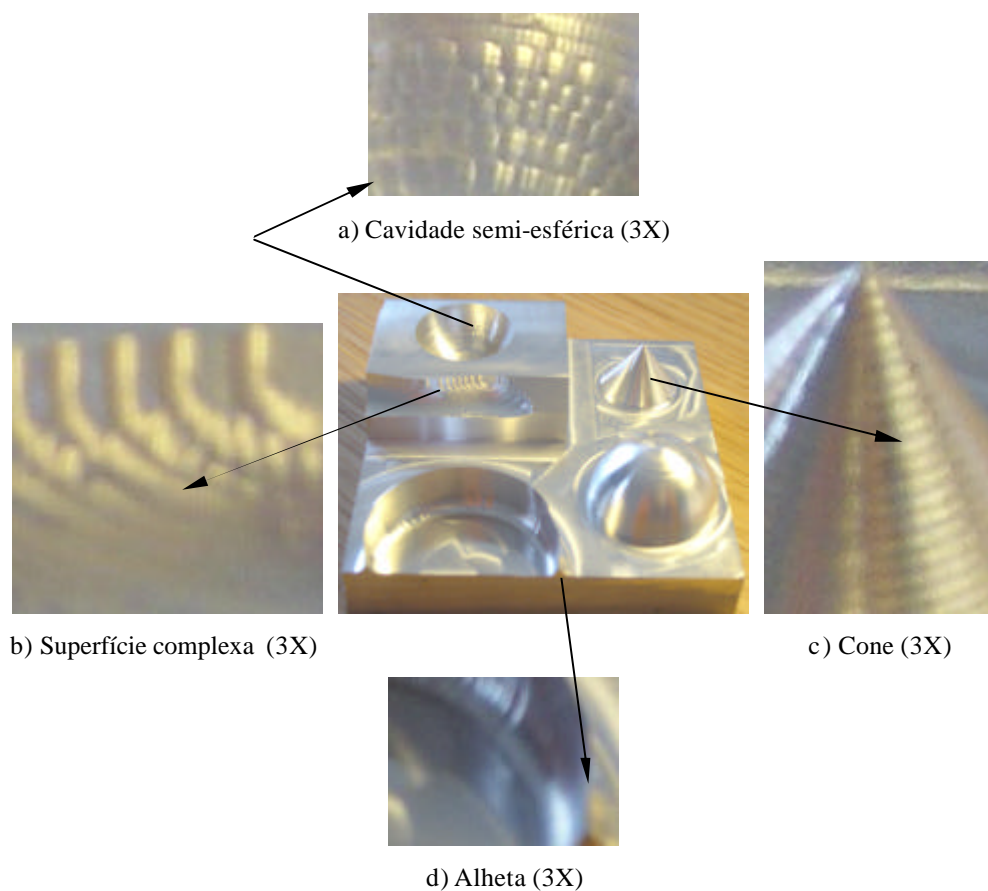


Figura 6.14 Peça maquinada (0,6X) e principais zonas críticas observadas

A figura 6.14 a), b), c), mostra três situações que revelam a utilização de um penetramento radial (*pr*) elevado, responsável pelo aspecto facetado nas superfícies maquinadas. A figura 6.14 d) mostra um pormenor da alheta que ficou fracturada nos cantos. Esta fractura poderá dever-se à existência de esforços alternados motivados pela passagem da ferramenta da face côncava para a convexa.

Feitas as correcções convenientes ao programa, maquinou-se outra peça, representada na figura 6.15.

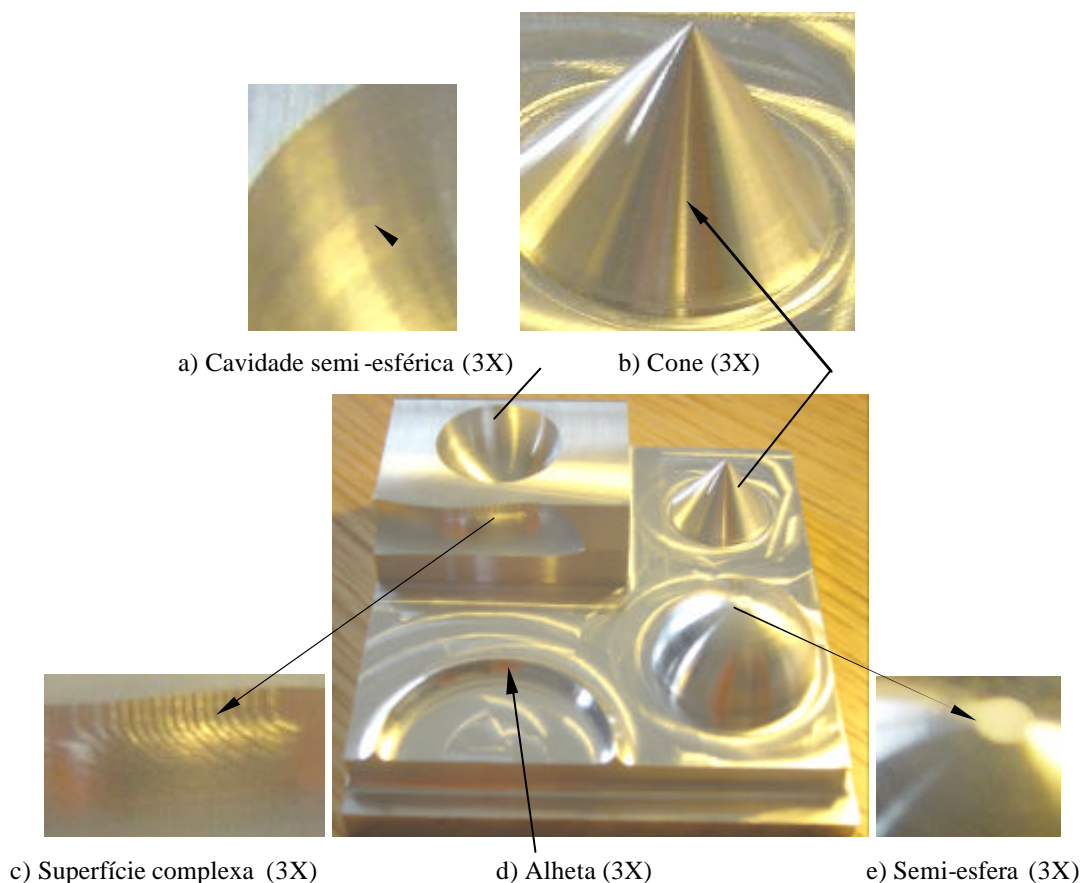


Figura 6.15 Peça maquinada (0,8X) após as primeiras correcções

Como mostra a figura 6.15 d), a situação mais problemática surgiu com a maquinagem da alheta. Até esta fase, tinha-se procurado fazer o seu acabamento, a partir de uma maior sobre-espessura de material (0,3mm), de forma que a base da mesma se tornasse mais resistente. O efeito foi exactamente o contrário. Nas sucessivas passagens de acabamento, as forças geradas aumentaram, face a uma maior secção da apara, originando a rotura total da alheta junto à base.

Como pode ser observado na figura 6.15 a), b), e), o acabamento das superfícies é em geral melhor que o observado na figura 6.14. Os valores do penetramento axial (p) e o penetramento radial (pr) utilizados no acabamento da peça representada na figura 6.15, foram os que viriam a ser adoptados nos ensaios seguintes, ou seja, $p = 0,2 \text{ mm}$; $pr = 0,1 \text{ mm}$.

A superfície complexa apresentada na figura 6.15 c) apresenta-se ainda com um acabamento insatisfatório. Pode também verificar-se que o topo da semi-esfera, figura 6.15 e), apresenta uma pequena superfície plana. Esta situação ficou resolvida com a redefinição da cota zero do bloco de material no início da maquinagem.

Exploradas as potencialidades do “software”, foi feito novo ensaio para resolução destes problemas. Neste ensaio, o desbaste e acabamento da alheta foram realizados de forma incremental no decurso das várias passagens de desbaste. Ou seja, concluída a operação de desbaste da peça, a alheta está terminada. A figura 6.16. mostra a peça padrão depois destas correcções.

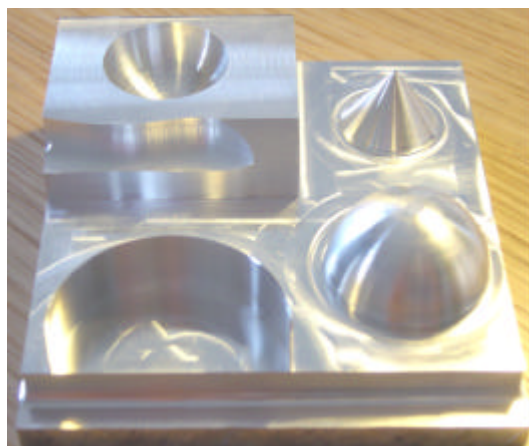


Figura 6.16 Peça padrão (0,8X) com todas as geometrias maquinadas

Depois de maquinada a peça representada na figura 6.16 foi possível verificar por observação visual, uma boa qualidade geral nas várias geometrias.

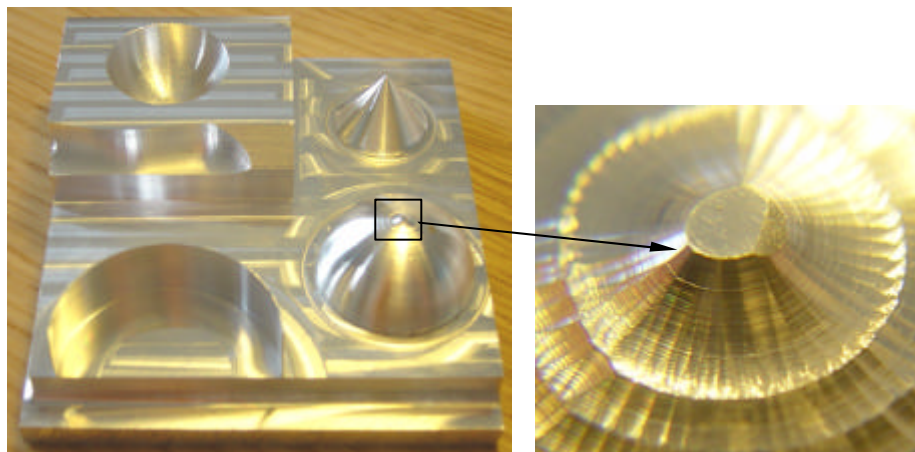
Com os ensaios preliminares na peça padrão, verificou-se que as geometrias rampa, superfície complexa e concordância, beneficiaram de um melhor acabamento quando se utilizou a estratégia parallel. No que se refere às geometrias cone, cavidade semi-esférica e semi-esfera, restavam ainda algumas dúvidas quanto à estratégia mais adequada. Entre as estratégias de acabamento disponíveis no MasterCam[®], foram seleccionadas quatro

(“contour”; “parallel”; “radial” e “scallop”) que à partida se enquadram nas três geometrias referidas (cone, cavidade semi-esférica e semi-esfera).

Tomando a peça da figura 6.16 como base de trabalho, foram maquinadas quatro peças. Em cada uma delas foi utilizada uma das quatro estratégias no acabamento das três geometrias referidas. As operações de desbaste e acabamento das restantes geometrias foram as mesmas nas quatro peças.

A optimização das estratégias foi realizada com uma velocidade de corte de 170 m/min e um avanço de 1200 mm/min nas operações de acabamento

A figura 6.17 mostra a peça padrão com aplicação da estratégia “contour” no acabamento das superfícies.

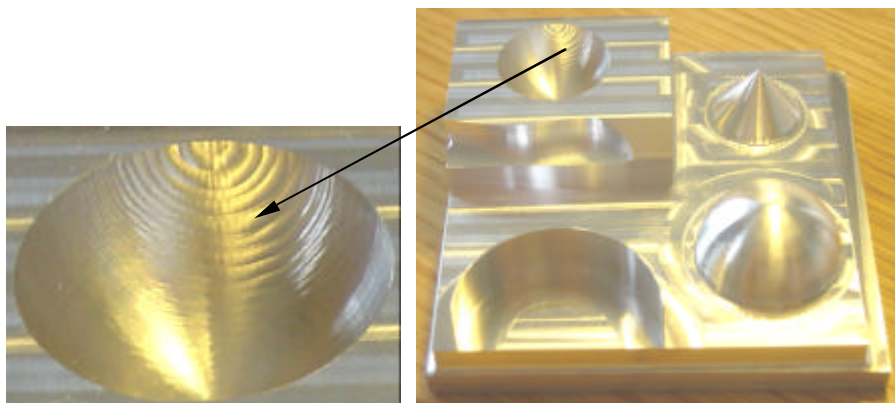


a) topo da semi-esfera

Figura 6.17 Peça padrão maquinada (0,8X) com aplicação da estratégia de acabamento “contour”

Como pode ser observado na figura 6.17 a), a estratégia “contour” revelou-se pouco eficaz, particularmente no topo da semi-esfera. A movimentação da ferramenta segundo o eixo Z é feita de forma incremental, o que acaba por se traduzir no aparecimento de “patamares”.

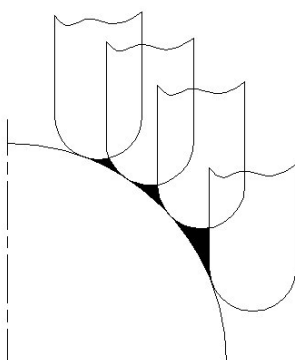
Na figura 6.18 apresenta-se a peça padrão com utilização da estratégia “parallel” no acabamento das superfícies.



a) Cavidade semi-esférica (2X)

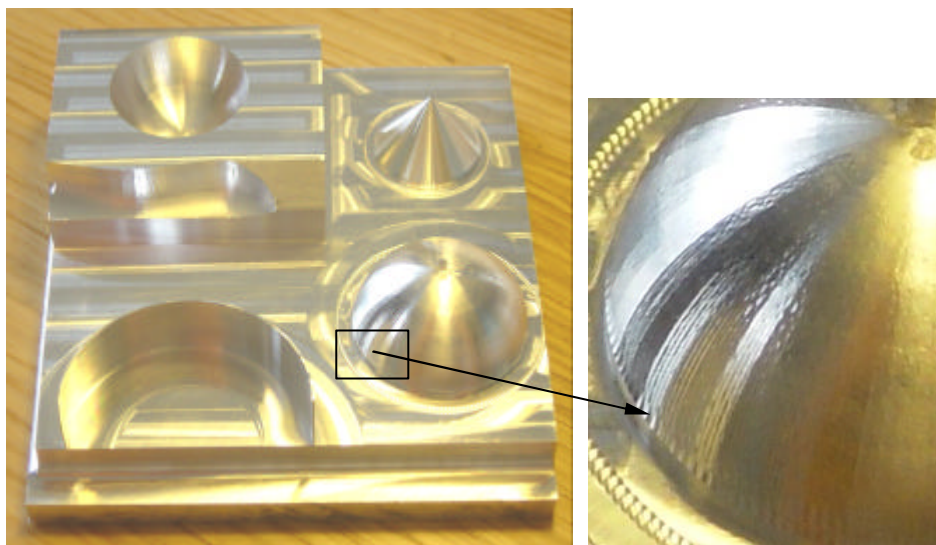
Figura 6.18 Peça padrão maquinada (0,8X) com aplicação da estratégia de acabamento “parallel”

Como pode verificar-se na figura 6.18 a), a cavidade semi-esférica apresenta sinais bem visíveis de sulcos da maquinagem. Podem observar-se visualmente, os patamares resultantes do incremento lateral da ferramenta. Esta estratégia revelou-se pouco adequada nas geometrias de revolução. Em zonas com geometria próxima da vertical, o mesmo incremento lateral entre passagens conduz a diferentes regiões de material não cortado, como se ilustra na figura 6.19.

**Figura 6.19** Exemplo do efeito do incremento lateral em geometrias próximas da vertical

A situação apresentada na figura 6.19 é desvantajosa porque conduz a superfícies maquinadas muito irregulares.

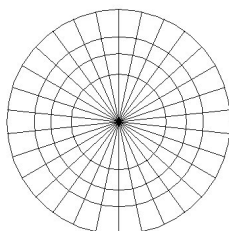
A figura 6.20 mostra a peça padrão maquinada com a estratégia “radial”



a) Pormenor da semi-esfera (3X)

Figura 6.20 Peça padrão maquinada (0,8X) com aplicação da estratégia de acabamento “radial”

Como se observa na figura 6.20 a estratégia “radial” conduz a superfícies onde é visível o fenómeno de facetamento. São também visíveis irregularidades junto à base da semi-esfera (figura 6.20 a)), onde o seu diâmetro é máximo. Recorrendo ao esquema da figura 6.21 é possível compreender melhor este fenómeno.

**Figura 6.21** Efeito do incremento lateral com a estratégia “radial”

Como pode ser observado na figura 6.21, o deslocamento da ferramenta com a estratégia radial, é feito do centro para a periferia da peça, ou vice-versa. O valor do incremento lateral é definido de forma angular. Junto ao centro da geometria há uma sobreposição de passagens, enquanto na periferia se verifica um afastamento entre passagens adjacentes. Este efeito é tanto mais acentuado, quanto maior for o diâmetro máximo da geometria a maquinar. A redução deste efeito é conseguida à custa de um menor incremento lateral que se traduz num aumento do tempo de maquinagem.

Por último, foi ensaiada a estratégia “scallop”. A figura 6.22 apresenta a peça padrão maquinada com esta estratégia.

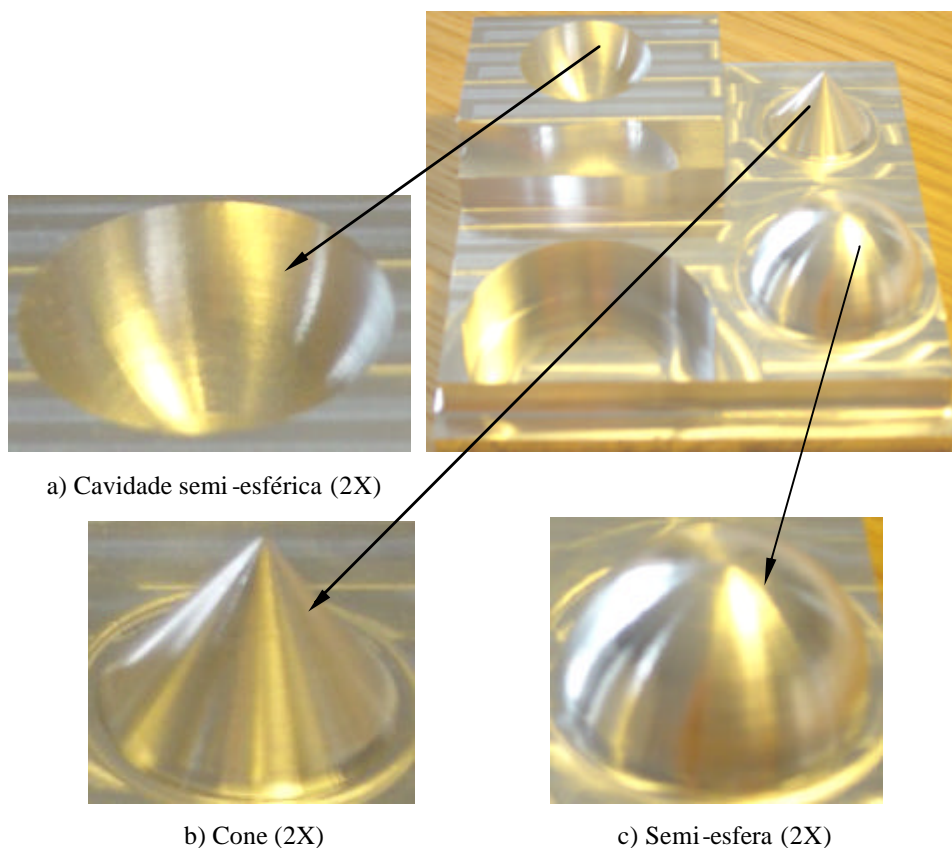


Figura 6.22 Peça padrão maquinada (0,8X) com aplicação da estratégia de acabamento “scallop”

As imagens apresentadas na figura 6.22 mostram claramente uma melhoria significativa nas geometrias de revolução (cone, semi-esfera e cavidade semi-esférica) acabadas com a estratégia “scallop”. Foi também possível observar, ainda durante as primeiras correções, que nas geometrias rampa, superfície complexa e concordância, a estratégia “parallel” era a que produzia melhores resultados.

As operações de desbaste e semi acabamento foram realizadas do mesmo modo em todas as peças.

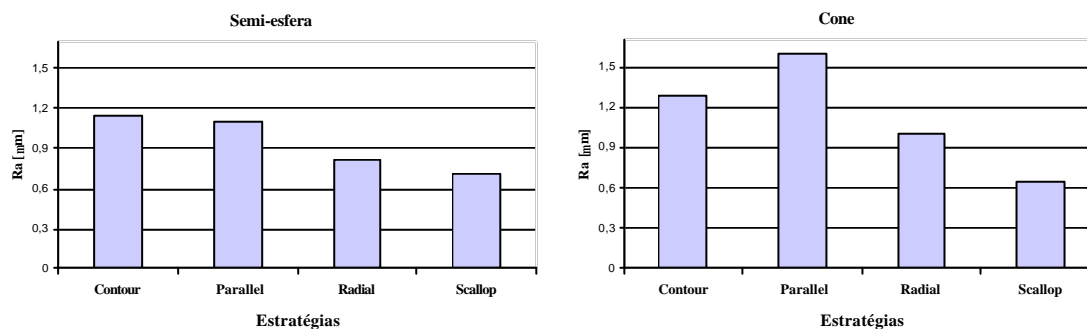
A tabela 6.3 permite comparar os tempos de maquinagem das quatro peças anteriores em função das estratégias utilizadas nas várias geometrias.

Tabela 6.3 Tempos de maquinagem das peças com diferentes estratégias de acabamento

	OPERAÇÃO	PEÇA 1		PEÇA 2		PEÇA 3		PEÇA 4	
		ESTRATÉGIA	TEMPO [h:min:s]	ESTRATÉGIA	TEMPO [h:min:s]	ESTRATÉGIA	TEMPO [h:min:s]	ESTRATÉGIA	TEMPO [h:min:s]
Desbaste; Semi-acabamento; acabamento das superfícies planas	Contorno do bloco	"Contour"	0:02:53	–	0:02:53	–	0:02:53	–	0:02:53
	Desbaste	"Surface Rough Pocket"	0:25:05	–	0:25:05	–	0:25:05	–	0:25:05
	Acabamento superfícies planas	"Pocket"	0:06:50	–	0:06:50	–	0:06:50	–	0:06:50
	Semi acabamento	"Restmill"	0:09:06	–	0:09:06	–	0:09:06	–	0:09:06
Acabamento	Superfície complexa	"Surface finish parallel"	0:02:53	–	0:02:53	–	0:02:53	–	0:02:53
	Concordância	"Surface finish parallel"	0:09:55	–	0:09:55	–	0:09:55	–	0:09:55
	Rampa	"Surface finish parallel"	0:01:08	–	0:01:08	–	0:01:08	–	0:01:08
	cavidade semi-esférica	"Surface Finish Contour"	0:17:00	"Surface Finish parallel"	0:04:57	"Surface Finish radial"	0:04:39	"Surface Finish Scallop"	0:05:10
	Semi-esfera	"Surface Finish Contour"	0:06:54	"Surface Finish parallel"	0:16:44	"Surface Finish radial"	0:07:59	"Surface Finish Scallop"	0:14:51
	Cone	"Surface Finish Contour"	0:02:42	"Surface Finish parallel"	0:07:53	"Surface Finish radial"	0:05:11	"Surface Finish Scallop"	0:06:40
Tempo Total de maquinagem [h:min:s]			1:24:26		1:27:24		1:15:39		1:24:31

Como se pode verificar pela análise da tabela 6.3, quando se utilizou a estratégia “radial” no acabamento das geometrias de revolução (cavidade semi-esférica, semi-esfera e cone) o tempo total de maquinagem foi menor. Nos restantes casos os tempos de maquinagem foram semelhantes. Contudo o factor tempo, nesta ou noutra circunstância, não poderá ser o único factor de decisão sobre a melhor estratégia de maquinagem a adoptar.

Na figura 6.23 são apresentados, a título de exemplo, os valores de R_a (rugosidade média aritmética) para as geometrias semi-esfera e cone, acabadas com diferentes estratégias.

**Figura 6.23** Valores de R_a obtidos com diferentes estratégias de acabamento nas geometrias semi-esfera e cone

A análise da figura 6.23, permite verificar que a estratégia “Scallop” conduziu a melhor acabamento nas geometrias semi-esfera e cone. Esta verificação confirmou o que havia sido observado visualmente.

Na figura 6.24 são apresentados os valores de R_t (amplitude máxima do perfil de rugosidade) para as mesmas geometrias.

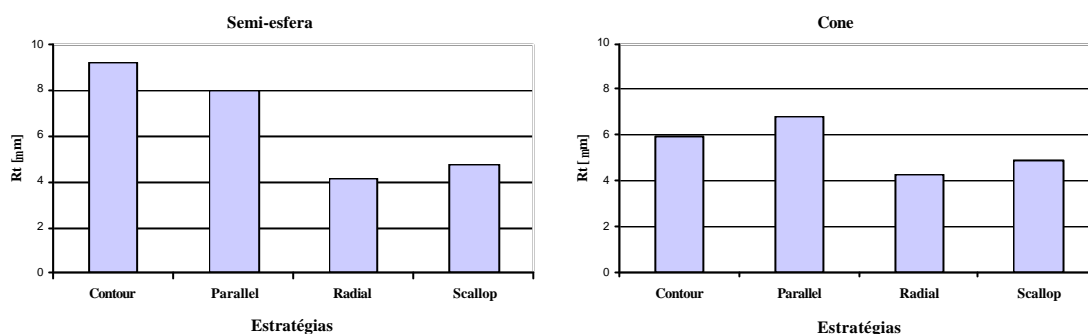


Figura 6.24 Valores de R_t obtidos com diferentes estratégias de acabamento nas geometrias semi-esfera e cone

Na figura 6.24 podemos observar que a estratégia “Radial” conduziu a um menor valor de R_t nas duas geometrias.

Com base nos parâmetros de rugosidade e na observação visual das peças maquinadas, a estratégia “Scallop” revelou-se a melhor opção para o acabamento das superfícies de revolução (cavidade semi-esférica, semi-esfera e cone). Foi ainda possível verificar que cada geometria é um caso particular, havendo uma estratégia mais favorável à sua maquinação.

6.4 Otimização dos parâmetros de corte na peça padrão

Com base nos resultados obtidos com os provetes planos e depois de ensaiadas as estratégias descritas na secção 6.3, foram realizados ensaios de acabamento na peça padrão utilizando as seguintes velocidades de avanço: 1600; 2000; 2400 mm/min. Foram realizados ensaios com a turbina pneumática de alta rotação (750 m/min) e com a cabeça “standard” da máquina (170 m/min).

A opção por estes valores de avanço baseou-se na maior proximidade de resultados obtidos nos ensaios realizados com os provetes planos, em termos de R_a , para as duas velocidades de corte referidas.

Para as peças maquinadas foram medidos parâmetros de rugosidade (R_a e R_t) e avaliada a precisão dimensional das principais geometrias que compõem a peça padrão.

Com base nos resultados obtidos com a optimização de estratégias, foram estabelecidas as estratégias de acabamento mais favoráveis a cada geometria.

Na tabela 6.4 são apresentadas as operações comuns a todas as peças a ensaiar.

Tabela 6.4 – Operações de desbaste e semi-acabamento a que foram submetidas as peças maquinadas

Operação	Estratégia utilizada	Vc [m/min]	a [mm/min]	p [mm]
Contorno exterior do bloco	“Contour”	390	1500	4
Desbaste	“Surface Rough Pocket”	200	1100	2
Acabamento das superfícies planas	“Pocket”	200	1100	0,2
Semi-acabamento	“Restmill”	200	800	2 (máx.)

Na tabela 6.5 encontram-se resumidas as estratégias usadas no acabamento das diferentes geometrias e os respectivos parâmetros de corte utilizados.

Tabela 6.5 – Estratégias e parâmetros utilizados no acabamento das várias geometrias:

Geometria	Estratégia usada no acabamento	Velocidade de corte (Vc) [m/min]	Avanço (a) [mm/min]	Profundidade de corte radial – “stepover” (pr) [mm]	Profundidade de corte axial (p)[mm]
Semi-esfera	“Finish constant scallop”	170 750	1600 2000 2400	0,1	0,2
Cavidade semi-esférica	“Finish constant scallop”				
Cone	“Finish constant scallop”				
Rampa	“Surface finish parallel”				
Superfície complexa	“Surface finish parallel”				
Concordância	“Surface finish parallel”				

A largura de corte máxima (penetramento radial pr) seleccionada no “software” foi em todas as situações igual a 75% do diâmetro da ferramenta. Este valor corresponde a um valor máximo a assumir pelo programa caso ocorra algum erro na introdução do valor daquele parâmetro.

Na programação das operações, foram definidos limites de controlo com a função de delimitar o percurso da ferramenta, reduzir os tempos mortos e evitar colisões com as geometrias da peça. Na figura 6.25 encontram-se representados esses limites.

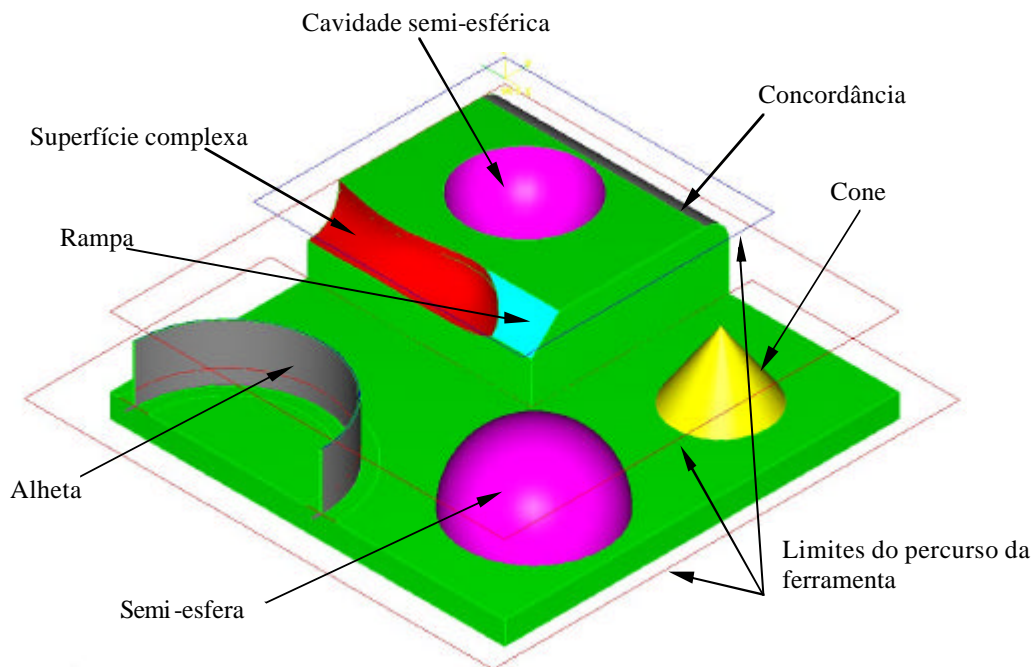


Figura 6.25 Representação dos limites do percurso da ferramenta nas diferentes fases de maquinagem

Os limites representados na figura 6.25 definem os contornos das zonas principais da peça: a base, onde assenta o cone, semi-esfera e alheta e o topo onde se situa a cavidade semi-esférica, rampa e superfície complexa.

Na figura 6.26 são apresentadas, a título de exemplo, duas peças maquinadas com a turbina de alta rotação e com a cabeça “standard” da máquina, para um avanço de 1600 mm/min.



a) S40.000 F1600



b) S9.000 F1600

Figura 6.26 Peças maquinadas com um avanço de 1600 mm/min (0,8X)

Por observação visual, verificou-se, de um modo geral, um melhor acabamento com a turbina de alta rotação.

Para complementar a observação visual das peças maquinadas foram medidos os valores de rugosidade Ra e Rt nas geometrias semi-esfera, cone e rampa.

A medição dos parâmetros de rugosidade nas geometrias que compõem a peça padrão está condicionada pelo seu correcto posicionamento. A figura 6.27 ilustra o procedimento adoptado para posicionar as peças e medir a rugosidade nas geometrias consideradas.



Figura 6.27 Utilização de calços de apoio para fixação das peças e medição da rugosidade

O procedimento ilustrado na figura 6.27, permitiu posicionar e orientar as geometrias, face ao curso do apalpador.

Na figura 6.28 são apresentados os gráficos de Ra em função do avanço, para as geometrias semi-esfera, cone e rampa.

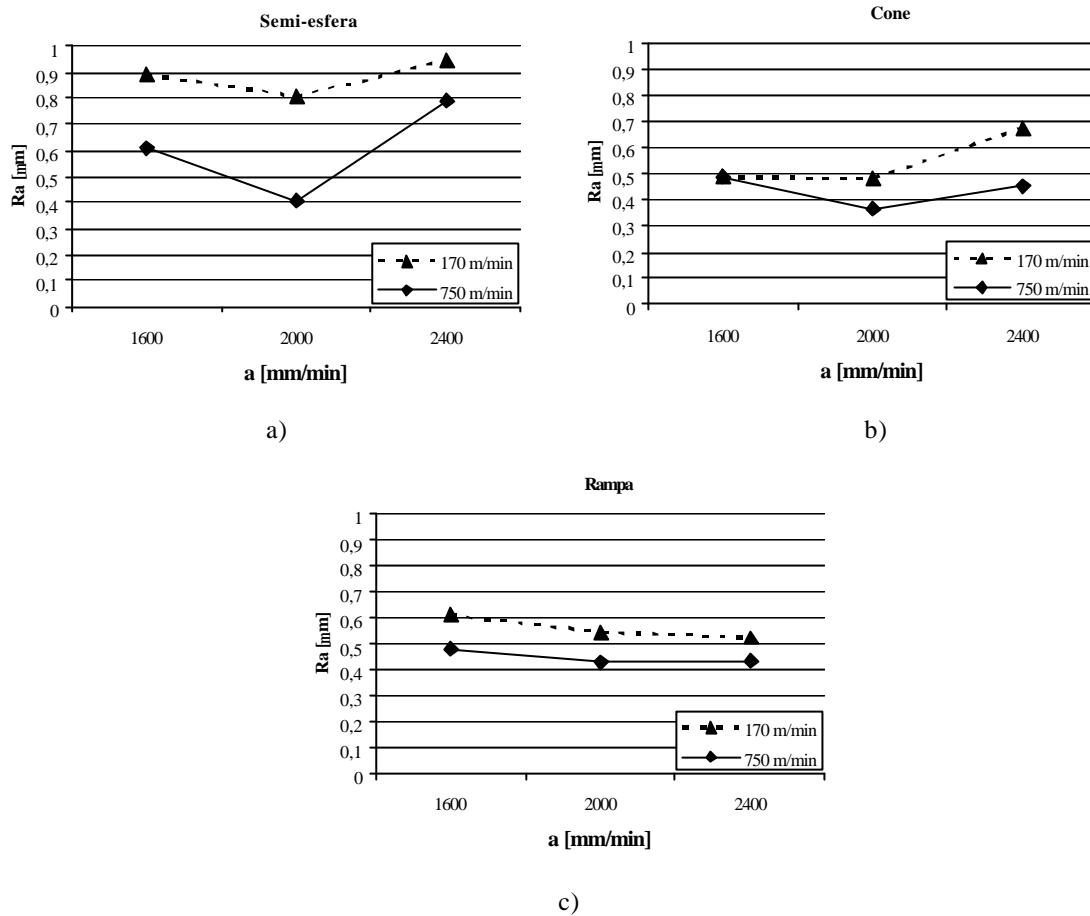


Figura 6.28 Valores de Ra em função do avanço para diferentes geometrias

Como pode ser observado na figura 6.28, os valores de Ra foram inferiores quando se utilizou a turbina de alta rotação. Na figura 6.29 apresentam-se os valores de Rt em função do avanço, para as mesmas geometrias.

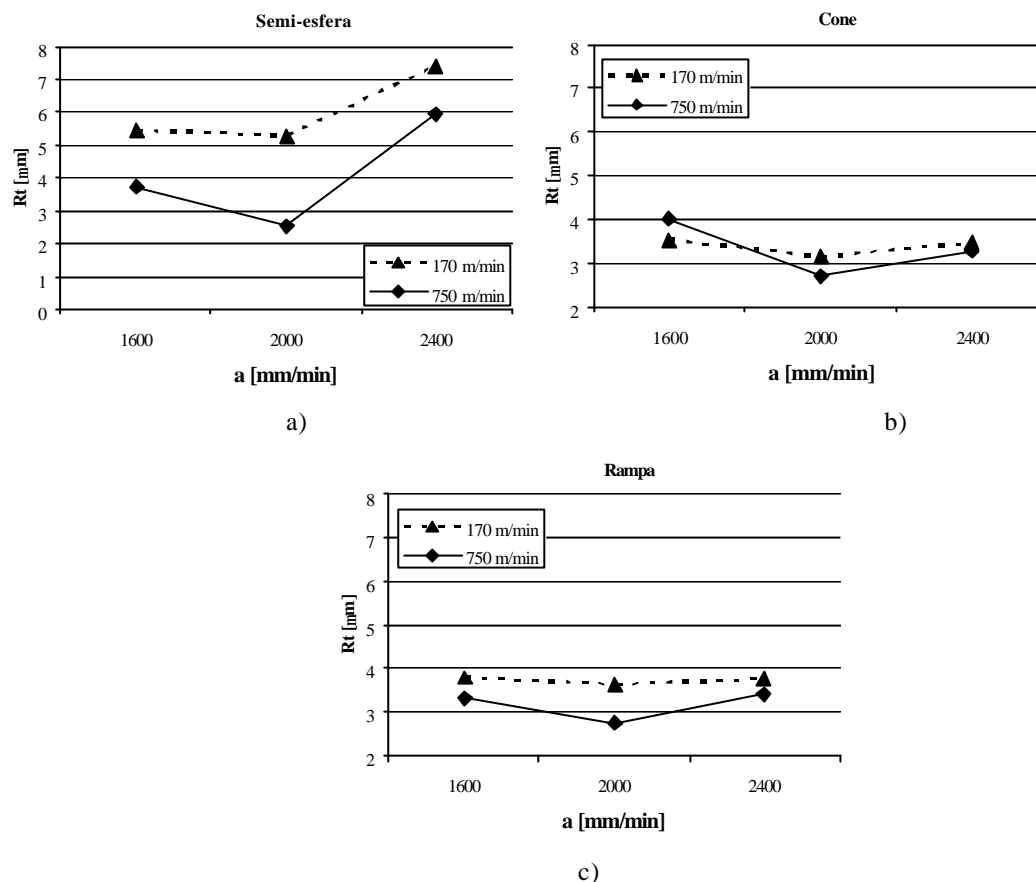


Figura 6.29 Valores de R_t em função do avanço para diferentes geometrias

Como se pode observar na figura 6.29, os valores de R_t são inferiores para a turbina de alta rotação no caso das geometrias semi-esfera e rampa, à semelhança do que acontece com o valor de R_a . No caso do cone os valores de R_t são semelhantes.

Para complementar a análise das superfícies obtidas, procedeu-se, a título de exemplo, ao controlo da **precisão dimensional** das geometrias da peça padrão assinaladas na figura 6.30 (diâmetro da semi-esfera (E), diâmetro da cavidade semi-esférica (G) e raio da concordância (M)). Foram consideradas as peças obtidas com a rotação “standard” do centro de maquinagem e com a turbina de alta rotação, para os três valores de avanço usados nos ensaios. Foi usada uma máquina de medição por coordenadas (Mitutoyo® - B715).

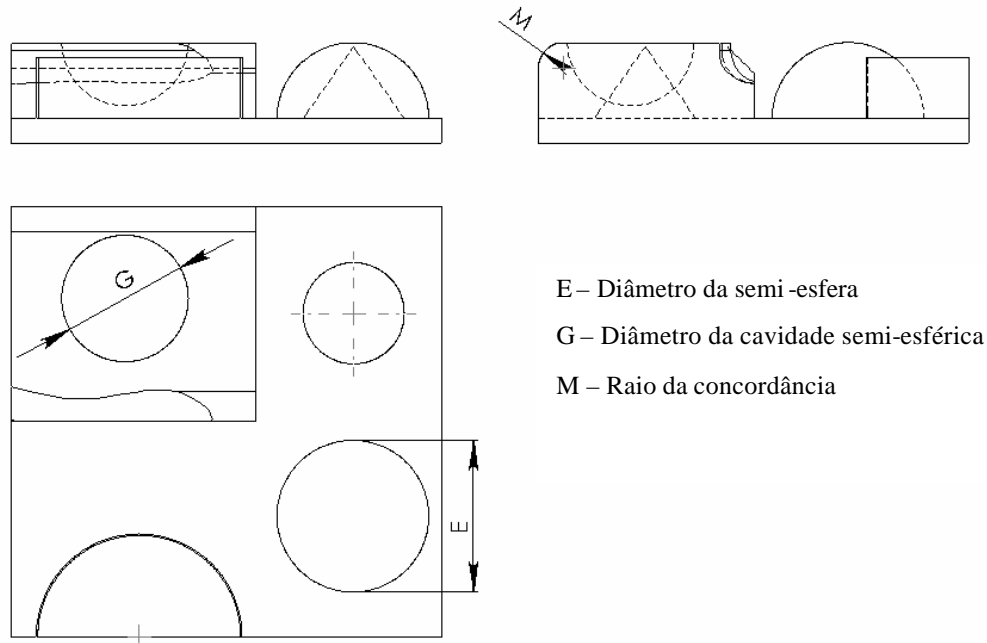


Figura 6.30 Dimensões a controlar na peça padrão

Recolhidas as várias dimensões, foram elaborados os gráficos apresentados na figura 6.30. Estes gráficos representam os desvios das medidas obtidas em relação à cota nominal, em função das condições de corte (rotação – S e avanço – F).

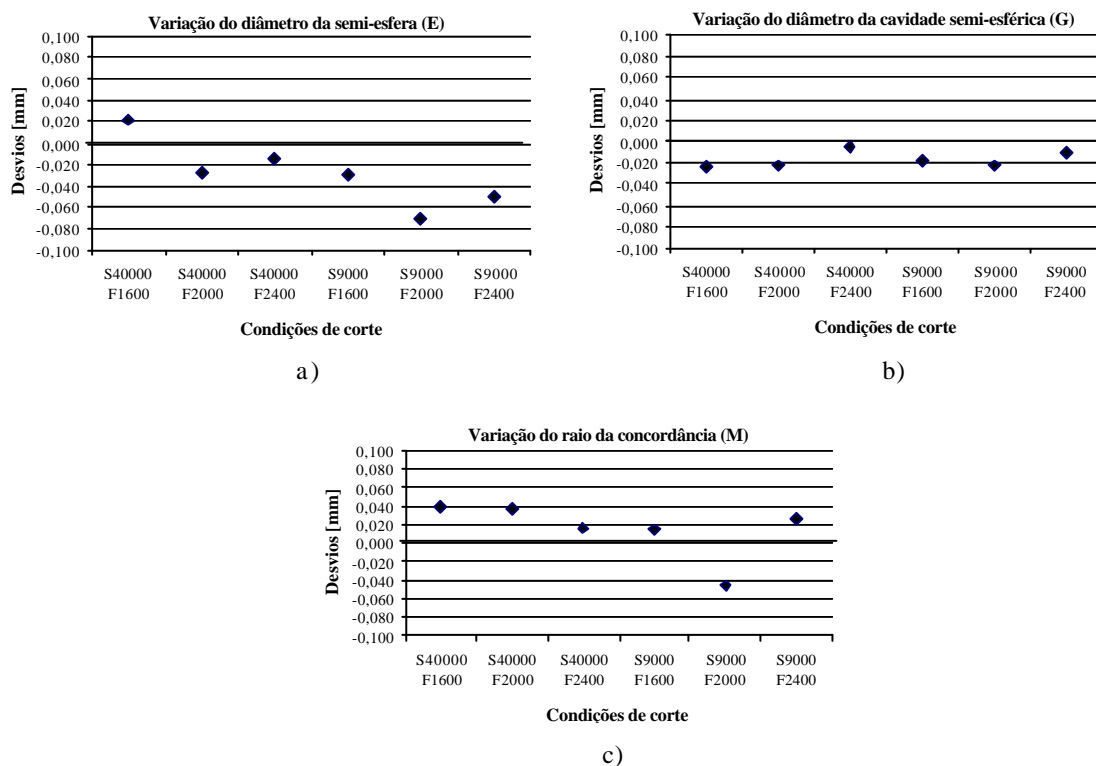


Figura 6.30 Desvios das cotas das geometrias analisadas, para as diferentes condições de corte.

A figura 6.30 permite verificar a semelhança entre as cotas obtidas e as programadas para as diferentes geometrias.

Feita a análise dos resultados com recurso aos diferentes processos, pode concluir-se que para as condições ensaiadas, a turbina de alta rotação manifestou um bom desempenho, em especial na fresagem plana para avanços elevados e na fresagem das superfícies complexas. Esse desempenho manifestou-se principalmente ao nível da qualidade das superfícies obtidas. Importa reforçar que estas turbinas são concebidas para trabalhar com ferramentas de pequeno diâmetro (menor que 6 mm). O diâmetro das ferramentas usadas nestes ensaios proporcionou uma análise que pode ser considerada uma situação limite para a turbina. A utilização de ferramentas de menor diâmetro iria por um lado proporcionar melhores resultados com a turbina de alta rotação, mas por outro iria inviabilizar o estudo comparativo com a rotação “standard” da máquina utilizada.

Esta investigação permitiu também reforçar a relatividade do conceito de maquinagem a alta velocidade, face aos bons resultados obtidos com recurso a uma máquina com a rotação máxima de 10000 rpm. Com a utilização dos parâmetros de corte correctos e das ferramentas adequadas é possível obter uma boa qualidade e precisão das peças maquinadas.

Quando comparamos a gama de rotações normalmente consideradas em alta velocidade com a rotação máxima possível da máquina usada nos ensaios, poderemos ser levados a admitir que as potencialidades deste tipo de máquina são muito limitadas. O avanço por aresta de corte a_z (ou avanço por dente) é dado pela seguinte expressão:

$$a_z = \frac{a}{z \cdot n} \quad [\text{mm}/(\text{z.rot.})] \quad (6.1)$$

onde a é o avanço [mm/min]; z é o número de arestas de corte; n o número de rotações por minuto da ferramenta [rpm].

Com base na expressão 6.1 verificamos que para a rotação utilizada com a cabeça “standard” da máquina (9.000 rpm), aos avanços usados nos ensaios – 1600; 2000 e 2400 mm/min correspondem os avanços por aresta de corte de 0,08; 0,11 e 0,13 mm/(z.rot.). Estes valores são ligeiramente superiores aos recomendados pelo fabricante das ferramentas (de 0,05 a 0,1 mm/(z.rot.)¹). Mantendo a linearidade da expressão 6.1, a

¹ Catálogo Sandvik nº C-1102:2-POR/02 (Fabricação de moldes e matrizes), pág 136

turbina de alta rotação deveria maquinar com avanços de 6400; 8800 e 10400 mm/min para manter os mesmos avanços por aresta de corte. Contudo, a utilização destes valores seria irrealista, face aos valores elevados de Ra obtidos com avanços a partir de 6000 mm/min.

A partir dos resultados globais obtidos pode afirmar-se que para valores de avanço elevados, o factor rotação é fundamental para a qualidade das superfícies maquinadas, principalmente quando se utilizam ferramentas de pequeno diâmetro (inferior a 6 mm) e ferramentas de topo esférico. Nestas situações, a utilização de turbinas de alta rotação é plenamente justificada.

Considerando o material ensaiado, as ferramentas utilizadas e face às geometrias em análise e resultados obtidos, pode considerar-se que a gama de avanços seleccionada (de 1600 a 2400 m/min) se ajusta às potencialidades da máquina-ferramenta.

7 SÍNTESE, CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

7.1 Síntese

Este trabalho teve como objectivo principal avaliar a utilização de uma turbina pneumática de alta rotação, como alternativa válida numa situação intermédia entre a maquinagem “convencional” e a maquinagem a alta velocidade. Foram realizados para o efeito testes comparativos de fresagem, utilizando uma turbina pneumática de alta rotação (da marca Air Turbine Tools[®], modelo FJX 230) e a rotação “standard de um centro de maquinagem vertical (Cincinnati[®], modelo Arrow 750) com uma rotação máxima de 10000 rpm.

O processo experimental passou pela selecção prévia do material e ferramentas. A opção por uma liga de alumínio (7050-T7451) residiu na utilização crescente deste material no fabrico de componentes mecânicos para as indústrias aeronáutica e automóvel e no fabrico de moldes de injeção para pequenas e médias séries de peças.

Foram realizados ensaios preliminares em provetes planos para determinar a gama de avanços, mais favorável, face às velocidades de rotação a utilizar (9000 rpm para a cabeça “standard” e 40000 rpm para a turbina de alta rotação). A avaliação da qualidade das superfícies foi avaliada através da medição de parâmetros de rugosidade usando um rugosímetro electromecânico (Hommelwerke[®] T1000) e por observação ao microscópio óptico (Zeiss[®], modelo Axiotech 100 HD) da topografia das peças maquinadas.

Foram também realizados ensaios em peças com superfícies complexas com o intuito de seleccionar as geometrias mais representativas da generalidade das aplicações industriais e os parâmetros de corte mais adequados. Foi também avaliada a viabilidade da utilização da técnica de quantidade mínima de lubrificante (*MQL – Minimal Quantity of Lubricant*) no processo de maquinagem.

Numa fase posterior foram realizados testes numa peça padrão, com o objectivo de avaliar as estratégias de maquinagem e os valores de avanço mais adequados às diferentes geometrias. Foi também efectuado um estudo comparativo da precisão dimensional de algumas geometrias obtidas com a turbina de alta rotação e com a cabeça “standard” da

máquina-ferramenta utilizada. As dimensões a controlar foram obtidas com recurso a uma máquina de medição por coordenadas (Mitutoyo[®] – B715).

Na modelação das peças foi utilizado o programa de modelação de sólidos Solidworks[®]. A programação das operações foi realizada com o programa MasterCam[®]. Nas várias etapas foi feita uma análise dos problemas relacionados com a integração CAD/CAM e as potencialidades do controlador da máquina ferramenta utilizada (integração CAD/CAM/CNC).

A caracterização das superfícies maquinadas foi realizada com base na inspeção visual das superfícies, medição de parâmetros de rugosidade (Ra ; Rt) e observação ao microscópio da topografia das peças.

7.2 Conclusões

Tendo em consideração a metodologia utilizada e os resultados obtidos nesta investigação, podem retirar-se as seguintes conclusões:

- ? Os testes realizados revelaram vantagens na utilização da turbina de alta rotação no *acabamento de superfícies planas*. Essa vantagem ficou demonstrada, por exemplo, pela maior robustez do perfil de rugosidade obtido com valores de avanço na ordem dos 6.000 mm/min, comparativamente aos resultados obtidos com a cabeça “standard” da máquina-ferramenta.
- ? A *fresagem em concordância* permite obter melhor acabamento das superfícies maquinadas utilizando a turbina de alta rotação, relativamente à cabeça “standard” da máquina-ferramenta.
- ? A utilização de *quantidade mínima de lubrificante (MQL)* revelou que esta técnica pode ser usada sem prejuízo da qualidade das superfícies maquinadas. Contudo, a sua aplicação nas máquinas em serviço requer a instalação de um sistema de aspiração que inclua um filtro separador de gotas, de forma a garantir as condições de higiene e segurança do operador.
- ? A *estratégia utilizada é fundamental* para a qualidade das superfícies obtidas na maquinação de geometrias complexas. Cada componente deve ser encarado

como um caso particular havendo uma estratégia mais adequada à sua geometria.

- ? A melhor estratégia é a que permite maquinar uma dada superfície e obter boa qualidade, com um tempo de maquinação mais curto.
- ? A maquinação a alta velocidade realizada com a turbina de alta rotação permite obter melhor acabamento e melhor precisão dimensional, comparativamente à cabeça “standard” da máquina.

Actualmente, devido à escassez de mão-de-obra qualificada e ao seu custo elevado, assiste-se a uma procura constante de processos de maquinação que reduzam ou eliminem a necessidade de acabamento manual das peças maquinadas. Um grande número de máquinas actualmente em serviço não possui características que permitam a sua reconversão a custos compatíveis com a sua produtividade.

Devido às características das turbinas de alta rotação e à sua fácil adaptação nas máquinas-ferramenta, a sua utilização revela-se muito promissora e deve ser encarada como uma solução alternativa entre a aquisição de máquinas de alta velocidade e a reconversão das máquinas “convencionais” existentes.

7.3 Trabalhos futuros

Concluído este trabalho de investigação fica-se com a noção das muitas direcções em que se pode evoluir no estudo da fresagem a alta velocidade. As potencialidades da máquina-ferramenta utilizada neste trabalho vão muito além da utilização restrita que dela foi feita nas experiências realizadas. A máquina está equipada com um quarto eixo que servirá de base para o estudo da maquinação de superfícies complexas. A programação destas geometrias constitui um de desafio interessante.

A modelação da fresagem com recurso a análise por elementos finitos será outro aspecto a desenvolver.

A exploração de outros programas CAD/CAM e o estudo dos pós processadores constituirão áreas de estudo num futuro próximo.

Finalmente, a maquinação de aços endurecidos com ferramentas avançadas é outra das áreas importantes a investigar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Balkrishna R., Yung C. Shin; "Analysis on high-speed face-milling of 7075-T6 aluminum using carbide and diamond cutter"; International Journal of Machine Tools and Manufacture; 41; 1763-1781; 2001.

Bernardos P.G.; Vosniakos G.C.; "Predicting surface roughness in machining: a review"; International Journal of Machine Tools and Manufacture; 43; 833-844; 2003.

Braga D., Anselmo D., Miranda G., Coppini N.; "Using a minimum quantity of lubricant (MQL) and a diamond coated tool in the drilling of aluminum-silicon alloy"; Journal of Materials Processing Technology; 122; 127-138; 2002.

Brinksmeier E., Mayr P., Lubben T., Pouteau P., Diersen P.; "Influence of material properties on surface integrity and chip formation in High Speed Turning"; Metal Cutting and High Speed Machining, edited by Dudzinski, D. et al; Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York; 31-40; 2002.

Dae K. Baek, Tae Jo Ko, Hee Sool Kim; "Optimization of feedrate in a face milling operation using a surface roughness model"; International Journal of Machine tools & Manufacture; Pergamon; 41; 451-462; 2001.

Davim, J.P.; "Princípios da Maquinagem"; Livraria Almedina; 167-177; 193-220; 1995.

El Mansori M., Lafdi K., Paulmier D.; "Enhanced Wear Resistance and Tool Durability Using Magnetization"; Metal Cutting and High Speed Machining; Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York; 301-310; 2002.

Fallbohmer P., Rodriguez C.A., Ozel T., Altan T.; "High-speed machining of cast iron and alloy steels for die and mould manufacturing"; Journal of Materials Processing Technology; 98; 104-115; 2000.

Ferraresi, D.; "Fundamentos de Usinagem dos Metais"; Edgard Blucher, Lda 8ª Ed.; 513-534; 1990.

Helleno A.L.; Schutzer K.; "Programação e Transmissão de dados na Tecnologia HSC"; In: Usinagem em Altíssimas Velocidades; Érica; 147-178; 2003.

Ikua B., Tanaka H., Obata F., Sakamoto S.; "Study on chatter vibration in ramping of Sculptured Surfaces"; Metal Cutting and High Speed Machining, edited by Dudzinski, D. et al; Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York; 141-149; 2002.

Kelly J.F., Cotterell M.G.; "Minimal lubrication machining of aluminium alloys"; Journal of Materials Processing Technology; 120; 327-334; 2002.

Kief H.B.; "Manual CN/CNC"; Gran DUC; 1998.

Kim B.H., Chu C.N.; "Texture prediction of milled surfaces using texture superposition method"; Computer-Aided Design; 31; 485-494; 1999.

Lacalle N.L., Urizar R.; "Fresado de Alta Velocidad – Proceso, maquinas e aplicaciones"; IMHE; 133-142; 1999.

Machado, A. R., Silva M. B.; "Fluidos de corte para HSM"; In: Usinagem em Altíssimas Velocidades; Érica; 49-79; 2003.

Moufki A., Devillez A., Dudzinski D., Molinari A.; "Thermomechanical Modeling of Cutting and Experimental Validation"; Metal Cutting and High Speed Machining; Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York; 51-67; 2002.

Rahman M., Kumar A S., Salam M. U.; "Experimental Evaluation on the effect of minimal quantities of lubricant in milling"; International Journal of Machine Tools and Manufacture; 42; 539-547; 2002.

Schey, J. A.; "Introduction to manufacturing Processes"; 3ª Edição; Mc Graw Hill; 617-724; 2000.

Schulz, H.; "Fraisage a Grande Vitesse des matériaux métalliques et non métalliques"; Sofetec; 2-57; 1997.

Shulz H.; Schutzer K.; "Tendências futuras da Usinagem com Altíssima Velocidade"; In: Usinagem em Altíssimas Velocidades; Érica; 204-213; 2003.

Schutzer K.; Shulz H.; "Histórico da Usinagem com Altíssima Velocidade até aos dias Actuais"; In: Usinagem em Altíssimas Velocidades; Érica; 13-28; 2003.

Selada A., Ferreira J.; "Maquinação a Alta Velocidade"; O Molde, nº 44; 25-27; 2000

Sokovic M., Mijanovic K.; "Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes"; Journal of Materials Processing Technology; 109; 181-189; 2001.

Vivancos J., Luis C.J., Costa L., Ortiz J.A.; "Optimal machining parameters selection in high speed milling of hardened steels for injection moulds"; Journal of Materials Processing Technology - Article in Press; 2004.

Warnecke G, Siems S.; "Dynamics in High speed Machining"; Metal Cutting and High Speed Machining; Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York; 21-30; 2002.

SIMBOLOGIA

a	Avanço
az	Avanço por dente
ϕ_o	Ângulo de saída
ϕ_f	Flexão da ferramenta
ϕ_x	segmento de deslocamento da ferramenta
D	Diâmetro da ferramenta
D_c	Diâmetro de corte
d_{mn}	Diâmetro de fixação da ferramenta
E	Módulo de elasticidade
ϕ_c	Ângulo de corte
F	Força centrífuga
F_r	Força radial
F_x	Força de corte
ϕ_a	Ângulo de ataque
I	Momento de inércia
l	Largura de corte
l_2	Comprimento total da ferramenta
L	Comprimento livre da ferramenta
ϕ_s	Ângulo de inclinação da aresta de corte
μ	Coefficiente de atrito apara/ferramenta
M	Massa da ferramenta
m	Massa em desequilíbrio
MRR	“Material Removal Rate” (Taxa de remoção de material)
p	Penetramento (penetramento axial) ou profundidade de corte
p_r	Penetramento radial (incremento radial)
ϕ_p	Ângulo de posição da aresta de corte
r	Distância ao centro de gravidade da massa em desequilíbrio
Ra	Rugosidade média aritmética
r_ϕ	Raio de ponta da ferramenta
R_t	Amplitude máxima de rugosidade

T	Tempo de vida da ferramenta
TPB	Tempo de processamento de bloco
t	Temperatura na interface apara/ferramenta
U	Desequilíbrio da ferramenta
V_c	Velocidade de corte
V_s	Velocidade de saída da apara
ω	Velocidade angular
z	Número de arestas de corte

ABREVIATURAS

CAD	"Computer-Aided Design"
CAD/CAM	Sistema combinado CAD e CAM
CAD/CAM/CNC	Sistema combinado CAD, CAM e CNC
CAM	"Computer-Aided Manufacturing"
CBN	Nitreto de Boro cúbico
CNC	"Computer Numerical Control"
HSC	"High Speed Cutting"
HSM	"High Speed Machining"
MDI	"Manual Data Input"
MQL	"Minimal Quantity of Lubricant"
PCD	Diamante policristalino
RAP	"Resident Assistant Programmer"
S	"Speed" [rpm] (velocidade de rotação)
F	"Feed rate" [mm/min] (velocidade de avanço)